



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**SNIŽOVÁNÍ TŘENÍ CÍLENOU MODIFIKACÍ
POVRCHŮ**

FRICTION REDUCTION BY SURFACE TEXTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Mauer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Milan Mauer**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Snižování tření cílenou modifikací povrchů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Požadavek na snižování tření představuje jednu z hlavních motivací pro výzkum a vývoj ve strojírenství. Jedním ze směrů jak snížit tření v kluzných kontaktech je cílená modifikace povrchu. Ukazuje se, že snížení tření závisí na geometrických parametrech textury a provozních podmínkách. Doposud testování vždy probíhalo bez možnosti přímého vhledu do kontaktu, a tedy nebylo možné získat informace o dějích probíhajících uvnitř pro interpretaci tření.

Typ práce: výzkumná
Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je objasnit spojitost mezi třením vzorku s cíleně modifikovaným povrchem a optickým pozorováním plochy kluzného kontaktu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu poznání,
- rozšíření univerzálního tribometru o optické pozorování,
- experimenty se vzorky s texturovaným povrchem,
- vyhodnocení a publikace výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

GROPPER, D., WANG, L., HARVEY, T. J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. Tribology International, 2016, 94: 509-529.

IBATAN, T., UDDIN, M. S., CHOWDHURY, M. A. K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 102-120.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je experimentálně objasnit spojitosti mezi třením vzorku s cíleně modifikovaným povrchem a optickým pozorováním plochy kluzného kontaktu. Práce se zaměřuje na konfiguraci kluzného ložiska, čehož je u tribometru block-on-ring dosaženo nahrazením bloku kruhovou safírovou úsečí. Pro pozorování formování mazacího filmu je na použitý tribometr implementována metoda optické interferometrie a fluorescence. Tyto úpravy umožňují zkoumat vliv texturovaného povrchu na součinitel tření a tloušťku filmu maziva. Ve smíšeném režimu způsobují textury výrazné navýšení hodnot tření a snížení tloušťky filmu maziva. Negativní vliv vtisků narůstá se zvyšující se velikostí radiálního zatížení. V hydrodynamickém režimu mají textury nižší negativní vliv na výsledné hodnoty, než tomu je ve smíšeném režimu. Změny jsou zde závislé na velikosti radiálního zatížení a viskozitě použitého maziva. V daném režimu není pozorován vznik kavitace a vliv texturovaného povrchu neodpovídá teoretickým předpokladům, což se projevuje nižší tloušťkou maziva a vyšším třením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Texturování povrchu, tření, konformní kontakt, kluzná ložiska, optická interferometrie a fluorescence

ANOTATION

The aim of this diploma thesis is to experimentally elucidate the connection between the friction of the specimen with the textured surface and the optical observation of the sliding contact surface. The thesis focuses on the configuration of the journal bearing. This configuration is achieved by replacing the block with a circular sapphire section on a block-on-ring tribometer. For exploring of the lubricant film formation, the method of optical interferometry and fluorescence is implemented on the block-on-ring tribometer. These adjustments allow examination of the effect of the textured surface on the friction coefficient and the thickness of the lubricant film. In a mixed mode, the textures cause a significant increase in friction values and reduce the thickness of the lubricant film. The negative influence of dimples increases with the increasing radial load size. In the hydrodynamic mode, the textures have a lower negative effect on the resulting values than in the mixed mode. The changes are dependent on the size of the radial load and the viscosity of the lubricant. In the hydrodynamic mode, cavitation was not observed, and the effect of the textured surface does not correspond to theoretical prerequisites, which is reflected by lower lubricant thickness and higher friction.

KEYWORDS

Surface texturing, friction, conformal contact, journal bearings, optical interferometry and fluorescence

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Mauer, M. *Snižování tření cílenou modifikací povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 89 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Šperkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za morální a finanční podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Snižování tření cílenou modifikací povrchů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šperky, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

.....
Bc. Milan Mauer

OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1 Zkoumaná oblast mazání	14
2.2 Cílená modifikace povrchu	15
2.3 Funkce cílené modifikace povrchu	15
2.4 Tvorba cílené modifikace povrchu	17
2.5 Experimentální a teoretické studie vlivu cíleně modifikovaných povrchů na mazání v kontaktech konformně zakřivených těles	19
2.5.1 Experimentální studie	19
2.5.2 Teoretické studie	30
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1 Analýza problému	34
3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	34
3.3 Podstata a cíle diplomové práce	35
4 MATERIÁL A METODY	36
4.1 Postup řešení	36
4.2 Experimentální zařízení	37
4.2.1 Popis měřicího zařízení	37
4.2.2 Snímání hodnot tření	38
4.2.3 Držák pro uchycení safíru	41
4.3 Optické měření	42
4.3.1 Optická interferometrie	43
4.3.2 Fluorescence	45
4.4 Kontaktní tělesa	47
4.4.1 Experimentální vzorky	47
4.4.2 Safírová úseč	48
4.5 Mazivo	48
4.6 Typy experimentů	49
5 VÝSLEDKY	52
5.1 Úvodní měření a ověření funkčnosti zařízení	52
5.1.1 Testy pro ověření funkčnosti upraveného zařízení	52
5.1.2 Testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti	53
5.1.3 Vliv zvýšené teploty v okolí místa kontaktu	54
5.2 Vliv texturovaného povrchu na hodnoty tření	55
5.2.1 Vliv textur na součinitel tření	56
5.2.2 Vliv textur na součinitel tření v hydrodynamickém režimu mazání	60
5.3 Vliv texturovaného povrchu na tloušťku mazacího filmu	61
5.3.1 Tloušťka mazacího filmu v kontaktní oblasti	61
5.3.2 Množství maziva v jednotlivých vtiscích	66
5.4 Pozorování kontaktní a kavitační oblasti	67
5.5 Lokální pozorování tloušťky maziva u texturovaného povrchu	68
6 DISKUZE	70
6.1 Vliv textur na koeficient tření a tloušťku mazacího filmu	70
6.1.1 Vliv textur ve smíšeném režimu mazání	70
6.1.2 Vliv textur v hydrodynamickém režimu mazání	74

6.2	Experimentální zařízení	75
6.3	Optické pozorování	76
6.3.1	Optická interferometrie	76
6.3.2	Fluorescenční metoda	77
7	ZÁVĚR	78
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	80
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	83
9.1	Seznam použitých zkratk	83
9.2	Seznam použitých symbolů	83
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	84
11	SEZNAM TABULEK	87
12	SEZNAM PŘÍLOH	88

1 ÚVOD

1

Téměř u každého mechanického zařízení dochází ke vzájemnému pohybu jednotlivých součástí, což má za následek vznik tření. Vlivem tření se jednotlivé části stroje výrazně opotřebovávají a je tak nutná jejich častější výměna. Dalším důsledkem jsou rovněž značné mechanické ztráty, které se např. u spalovacích motorů projevují zvýšením spotřeby pohonných hmot a navýšením množství výfukových plynů. Z daných důvodů je tedy potřeba hodnoty tření co nejvíce minimalizovat. K tomuto účelu jsou v praxi nejčastěji využívány různé druhy maziv, pomocí kterých lze oddělit povrchy dvou těles ve vzájemném kontaktu, aby se zabránilo jejich vzájemné interakci. Avšak během provozu technického zařízení často nastávají podmínky, kdy dochází k přerušení souvislé vrstvy maziva v kontaktu způsobené náhlou změnou zatížení nebo rychlosti třecích povrchů. Během této situace už nejsou běžné oleje schopny zajišťovat ideální tribologické vlastnosti a je potřeba do nich přidávat různé druhy přísad.

S cílem zajistit co nejnižší hodnoty tření a opotřebení se během posledních dvou desítek let začaly vědecké studie velmi podrobně věnovat aplikacím modifikace topografie třecích povrchů [1]. Studium je v dané oblasti soustředěno dvěma směry. Prvním je tzv. přirozená modifikace topografie, ke které dochází samovolně v průběhu výroby nebo vlivem kontaminace maziva. Druhým směrem je cílená modifikace topografie, která spočívá v záměrném vytváření vtisků na třecích površích. Vtisky pak mohou působit jako zásobníky maziva, které je později dodáváno do kontaktu během „kritického“ chodu stroje a navyšovat tak hydrodynamický tlak. Rovněž jsou schopny zachytávat částice opotřebení a zabraňovat tak jejich dalšímu působení. Vliv cílené modifikace povrchu na tribologické vlastnosti je neustále zkoumán ve všech režimech mazání [2,3]. Z dosavadních výzkumů vyplynulo, že snížení tření závisí na geometrických parametrech textury a provozních podmínkách.

Jelikož doposud testování probíhalo bez možnosti přímého vhledu do kontaktu, zabývá se tato diplomová práce experimentálním objasněním vlivu modifikovaného povrchu na tření v kontaktu konformně zakřivených těles (tlak pohybující se v rozmezí 0,1-30 MPa) využitím optického vhledu. K měření bude využit tribometr block-on-ring s cílem dosáhnout konfigurace kluzného ložiska, přičemž testy budou spočívat v měření koeficientu tření a využitím optického pozorování bude zkoumána tloušťka mazacího filmu a kavitace.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Zkoumaná oblast mazání

Utváření mazacího filmu [1] ve strojních uložení je převážně ovlivněno vzájemnou polohou třecích těles a jejich geometrií. Třecí povrchy mohou do sebe zapadat s velkou geometrickou přesností a mluvíme tak o styku konformně zakřivených těles (radiální a axiální kluzná ložiska). V druhém případě se povrchy součástí dotýkají na velmi malé kontaktní ploše a jedná se tak o styk nekonformně zakřivených těles (valivá ložiska, vačky, zdvihátka a kontakty zubů ozubených kol apod.). U konformně zakřivených těles dochází v místě styku při relativním pohybu k oddělení povrchů v důsledku nárůstu tlaku v mazacím filmu, jehož hodnota se pohybuje pouze v řádech megapascalů. Nedochází tak k elastickým deformacím na třecích površích a nastává zde tzv. hydrodynamický režim mazání. Naopak ve styku nekonformně zakřivených povrchů dochází ke vzniku elastické deformace třecích povrchů z důvodu velkého stykového tlaku pohybujícího se v řádech gigapascalů, ke kterému dochází vlivem malé kontaktní plochy. V tomto případě se jedná o tzv. elasto-hydrodynamický režim mazání.

Vliv povrchových textur je v oblasti tribologie zkoumán ve všech režimech mazání. Daná diplomová práce se však zaměřuje na jejich vliv v málo zatížených kontaktech (tlak pohybující se v rozmezí 0,1-30 MPa), kdy se převážně jedná o kontakty konformně zakřivených těles (kluzná ložiska). Výpočtem chování hydrodynamických kluzných ložisek se zabývali **Raimondi a Boyd** [4]. Veškeré výpočty vycházejí ze Sommerfeldova čísla (1), které je charakteristickým číslem kluzných ložisek.

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \frac{\eta \cdot n}{P} \quad (-) \quad (1)$$

Kde:

r	mm	poloměr čepu
c	mm	minimální radiální vůle
η	Pa·s	dynamická viskozita maziva
n	s ⁻¹	otáčky
P	MPa	tlak

Na základě Sommerfeldova čísla se z příslušného grafu stanoví charakteristické číslo tření pro daný typ použitého kluzného ložiska. Z tohoto čísla je následně možné stanovit hodnotu součinitele tření (2).

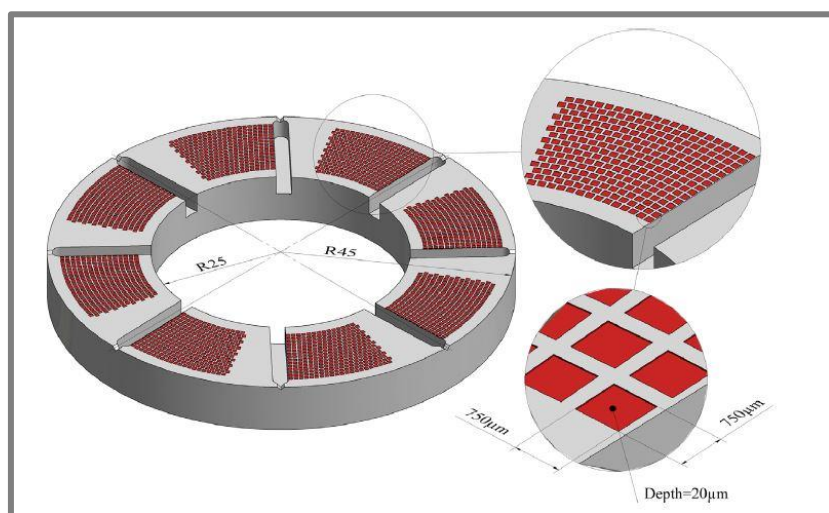
$$f = C/R \cdot \text{char. číslo tření} \quad (2)$$

Stejný postup platí i pro určení minimální tloušťky mazacího filmu (3), pro které je opět nejdříve nutné z grafu stanovit charakteristické číslo minimální tloušťky mazacího filmu.

$$h_0 = C \cdot \text{char. číslo minimální tloušťky mazacího filmu} \quad (3)$$

2.2 Cílená modifikace povrchu

Cílenou modifikací povrchu se rozumí zhotovování určitého počtu přesně definovaných identických prvků (důlky a drážky) na povrchu různých typů součástí. Příklad částečně texturovaného povrchu kroužku axiálního ložiska je možné vidět na Obr. 2-1. Avšak některé funkce povrchových textur, k jejichž popisu se dostaneme v dalším průběhu práce, mohou existovat v souvislosti s nerovnostmi povrchu, které vznikají na třecích površích samovolně. Dochází k tomu zejména v důsledku dokončovacích operací nebo z důvodu kontaminace maziva nečistotami. Nicméně tyto nerovnosti jsou oproti povrchovým texturám náhodně rozmístěny a není tak možné jakkoliv kontrolovat jejich geometrické parametry [1,2].



Obr. 2-1 Částečně texturovaný povrch kroužku axiálního ložiska [2]

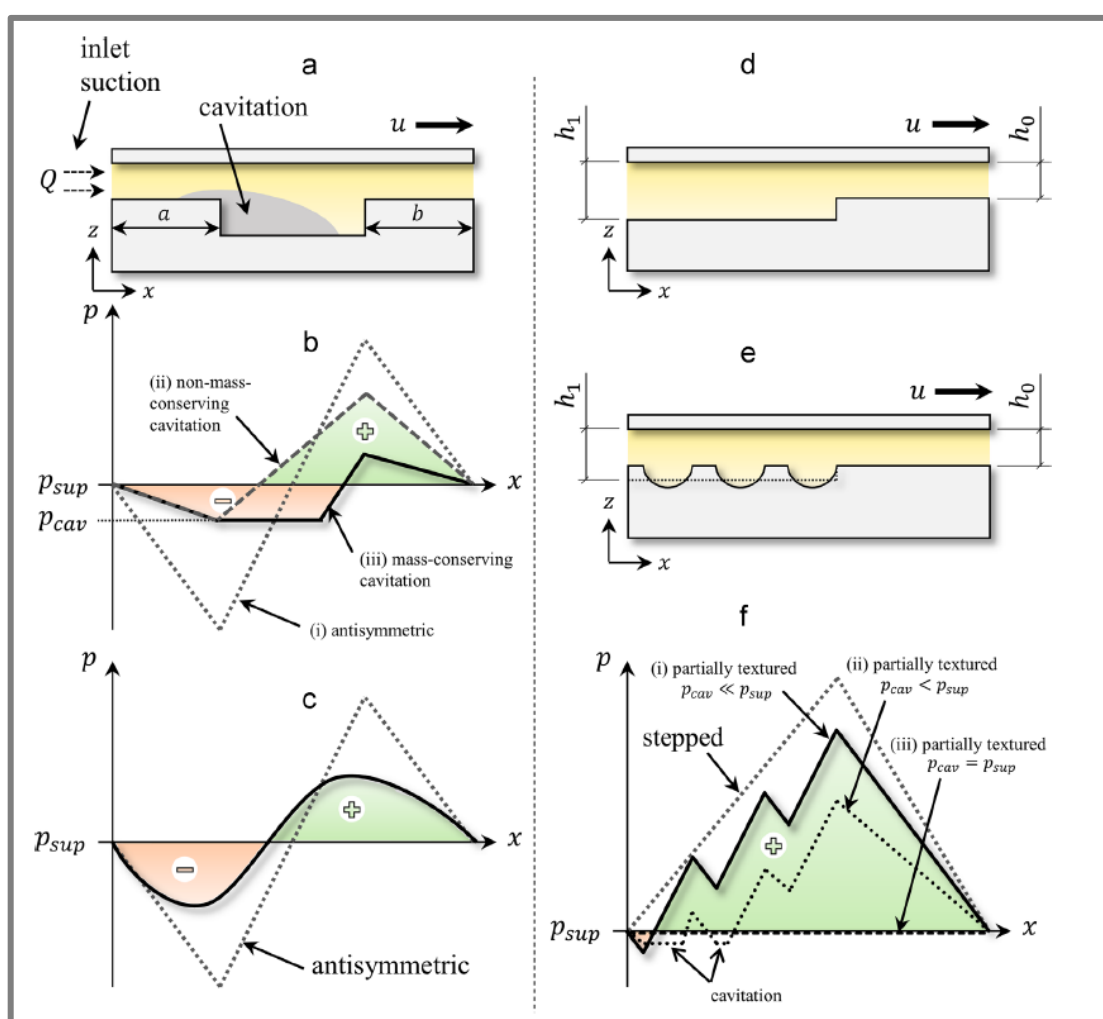
2.3 Funkce cílené modifikace povrchu

V oblasti vlivu povrchových textur na tribologický výkon mazaných kontaktů byly od roku 1966 napsány stovky studií [2]. Avšak přibližně polovina těchto prací je pouze teoretická, kde se autoři snaží daný problém objasnit na základě různých forem Reynoldsovy a Stokesovy rovnice. Jen velmi málo studií je zaměřeno na experimentální ověření.

Z provedených výzkumů v oblasti cíleně modifikovaných povrchů vyplynula řada funkcí, pomocí kterých by povrchové textury mohly značně přispět ke zlepšení vlastností mazaného kontaktu. V hydrodynamickém režimu mazání jsou schopny udržet mazivo v kontaktu po delší dobu a navyšovat hydrodynamický tlak. V případě přímého kontaktu těles textury zachytávají částice opotřebení a snižují velikost kontaktní plochy vedoucí ke snížení přilnavosti. Vtisky rovněž fungují jako zásobárny maziva, které pak dodávají do kontaktu při kritickém chodu stroje. Jedno z nejčastějších vysvětlení daných funkcí byl výskyt místní kavitace, která způsobila asymetrické rozložení tlaku v jednotlivých texturách. Jako odlišné vysvětlení některé studie uvádějí vznik setrvačných účinků, jiné zase dospěly k závěru, že vlivem setrvačnosti naopak dochází ke zhoršení výsledků. Vytvářené vtisky se liší svými tvary a geometrickými parametry. Na jejich správnou funkci mají zásadní vliv tři základní parametry. Jedná se zejména o tvar, hloubku a hustotu vtisků na třecím povrchu.

Pro zajištění co nejpříznivějšího vlivu cílené modifikace povrchu je nutná optimalizace daných parametrů. Nejčastěji používané tvary jsou elipsoidní, čtvercové, trojúhelníkové a kruhové, které jsou z hlediska výroby nejvhodnější [2,3,5].

U texturovaných povrchů mohou být jednotlivé mikro textury považovány za mikro konvergující klíny a pokud se jich na povrchu nachází větší počet, mohou působit jako sada mikro ložisek (Obr. 2-2). Ačkoli dochází k navyšování tlaku v konvergentní oblasti, objevuje se zároveň jeho snížení v divergentní oblasti. Z daného důvodu může tedy nastat pouze pozitivní nárůst tlaku vlivem přítomnosti textury a to tehdy, když je daný nárůst na odtokové hraně vyšší než pokles na zadní hraně textury. K tomuto jevu může docházet vlivem kavitace. Vznikající kavitační bubliny v jednotlivých vtiscích zabraňují vzniku lokálních negativních tlakových špiček, které by mohly narušit nárůst tlaku u konvergentních mikro klínů [6].



Obr. 2-2 a-buňka texture, b-rozložení tlaku v buňce texture s vlivem kavitace, c-rozložení tlaku v buňce texture s vlivem setrvačných sil, d-„stepped“ profil, e-texturovaný profil, f-rozložení tlaků [2]

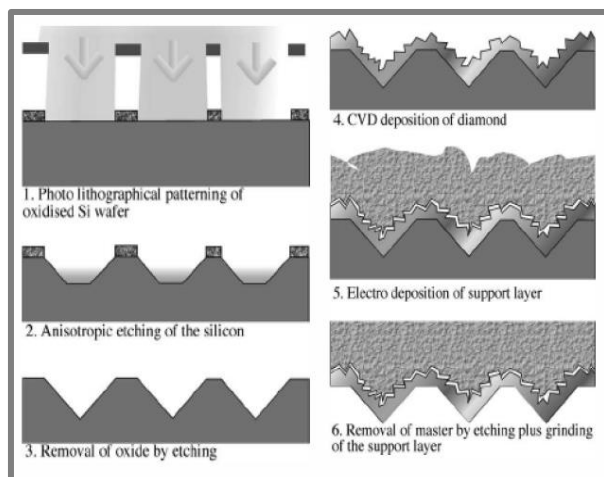
2.4 Tvorba cílené modifikace povrchu

Různé tvary textur mohou být na povrchu součástí realizovány pomocí několika odlišných technologií, které jsou postupem času neustále vyvíjeny a zdokonalovány.

Velmi často používaný způsob realizování cílené modifikace povrchu spočívá v mechanickém vyražení vzorových matic, nebo i jednotlivých vtisků do povrchu součástí. Touto metodou se zabýval **Petterson** [7], který se ve své práci zaměřil na postup výroby nástroje (základní matrice) a rovněž popisuje samotný proces tvorby vtisků. Základní matrice je vytvářena nanášením diamantového filmu na ocelovou formu. Film je zároveň podpořen tenkou vrstvou niklu. Na závěr je nástroj obroben na požadovaný tvar. Hotový nástroj je pak přitlačován na povrch součásti, čímž se docílí vytvoření pole vtisků definovaných tvarů a rozměrů.

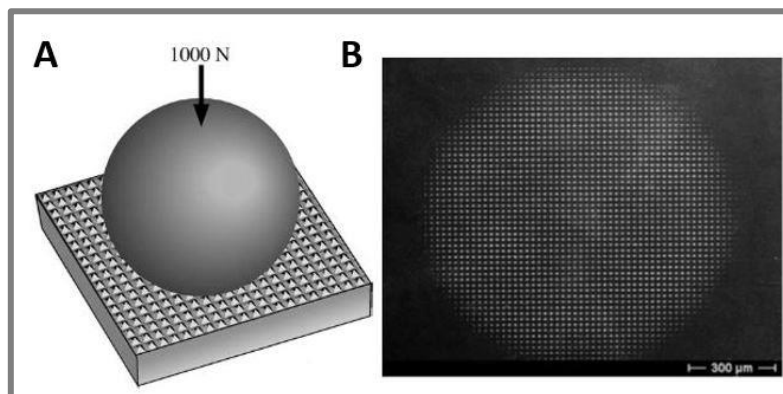
Tvorba texturovacího nástroje probíhá v 6 základních krocích (Obr. 2-3):

1. šablonování těsnícího materiálu na povrchu,
2. anizotropní leptání pro vytvarování formy,
3. odstranění oxidické vrstvy,
4. nanášení diamantového filmu na povrch formy,
5. podpora diamantového filmu niklem,
6. odkrytí povrchu nástroje odstraněním vrstvy silikonu.

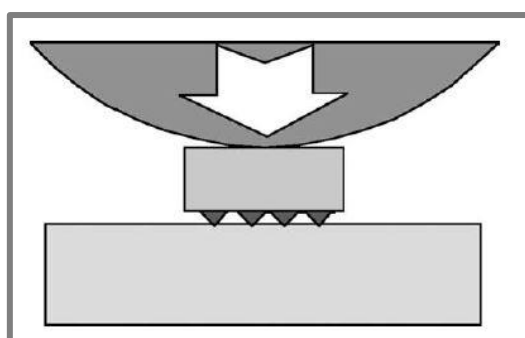


Obr. 2-3 Postup tvorby texturovacího nástroje [7]

Pomocí dané metody lze vytvořit velmi malé textury s různou geometrií. Minimální velikost jednoho vtisku je omezena rozlišením procesu, které se v daném případě pohybuje okolo 1 μm . Lze tak vytvořit hustotu až 250 000 vtisků na mm^2 . Maximální hloubka je limitována tloušťkou vrstvy těsnícího materiálu, která je přibližně 500 μm . Autor provedl experiment, při kterém ocelová kulička o průměru 10 mm působila silou 1000 N proti texturovacímu nástroji (Obr. 2-4). Danou technologii rovněž aplikoval i na rovinné vzorky, k čemuž použil ocelové desky o rozměrech 4 mm^2 , které byly zatíženy silou 1000 N a desky o rozměrech 78,5 mm^2 zatížené silou 450 00 N. Zatížení bylo přenášeno prostřednictvím ocelové kuličky působící na zadní stranu texturovacího nástroje (Obr. 2-5).

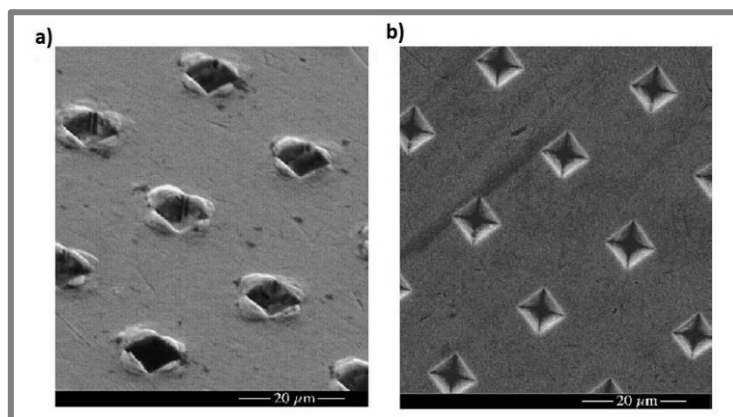


Obr. 2-4 A-proces texturování povrchu kuličky, B-výsledný texturovaný povrch [7]



Obr. 2-5 Způsob texturování rovinných vzorků [7]

Po vytlačovacím procesu zůstává v okolí vtisků vytlačený materiál (Obr. 2-6), který zvyšuje drsnost povrchu, je tedy vždy potřeba po modifikaci povrchu provést přešetření.



Obr. 2-6 a) vzorek před leštěním, b) vzorek po leštění [7]

Výše popsaná metoda je velmi univerzální a velmi často používaná, avšak v dnešní době se cílená modifikace povrchů začíná mnohem častěji provádět pomocí technologie *Laser Surface Texturing* (LST) [8]. Tato metoda se neustále zdokonaluje a lze pomocí ní vytvořit povrchové struktury s velmi přesně definovanou a snadno kontrolovatelnou geometrií. LST technologii použil ve své studii **Scaraggi** [9], který

studioval třecí vlastnosti mazaných a laserem texturovaných povrchů. K tvorbě textur použil ultrarychlý optický laser s pulsy trvající femto až piko sekundu a s frekvencí až 100 kHz. Danou metodou lze vytvořit texturovaný povrch na různých typech technických materiálů (karbid křemíku, ocel, oxid grafitu a další). V průběhu procesu dochází vzhledem k vysoké energii k tepelnému ovlivnění okolí vtisku a následné změně místních mikrostruktur a mechanických vlastností [3]. K minimalizování tepelně ovlivněné oblasti je nutná vhodná úprava pulsní energie a pulsní frekvence.

Dalšími možnými způsoby tvorby textur jsou frézování, mikro-lití a elektrochemické obrábění [3].

2.5 Experimentální a teoretické studie vlivu cíleně modifikovaných povrchů na mazání v kontaktech konformně zakřivených těles

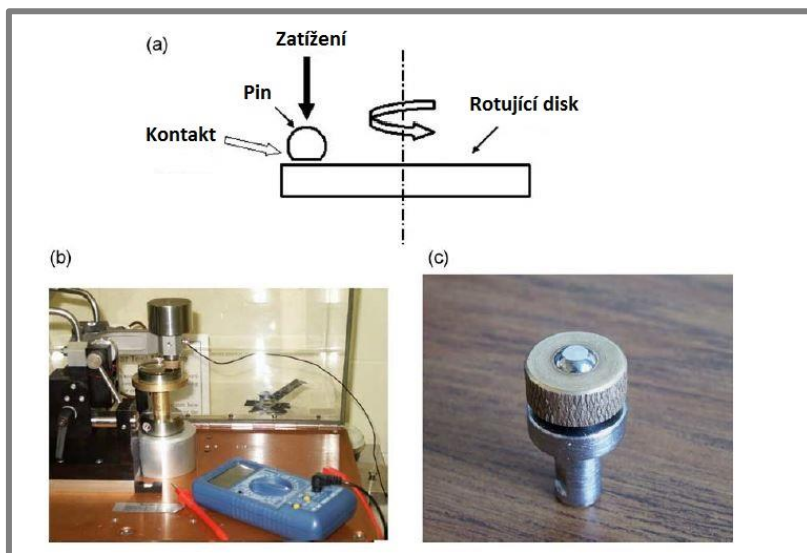
2.5

Tato kapitola je zaměřena na rozbor hlavních experimentálních studií v dané oblasti. Cílem tohoto rozboru je shrnutí dosavadních poznatků z experimentálních studií a popsání základních principů použitých při řešení dané problematiky. V oblasti konformních třecích povrchů je v současné době cílená modifikace topografie zejména studována u mechanických těsnění, pístních kroužků, radiálních a axiálních kluzných ložisek [2].

2.5.1 Experimentální studie

2.5.1

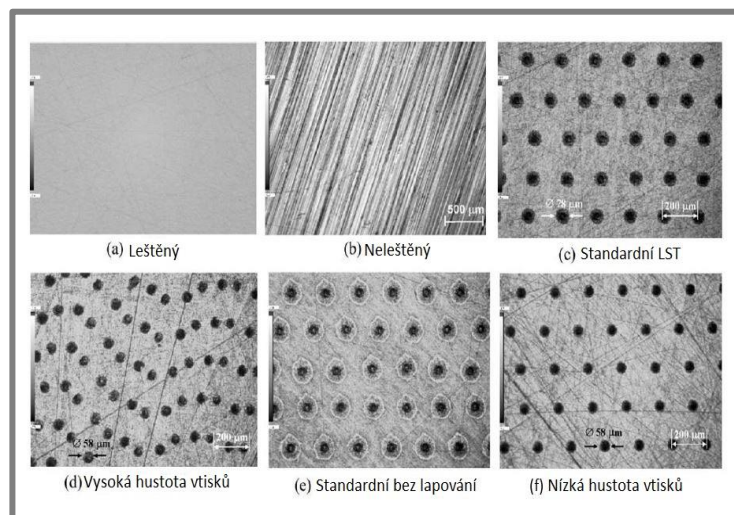
Ve studii [10] se **Kovalchenko** snažil objasnit vliv texturovaného povrchu na koeficient tření, za použití zařízení pin-on-disk (Obr. 2-7). K výrobě pinu použil ocelovou kuličku z kalené oceli 52100 o průměru 9,5 mm a nominální tvrdosti 60 HRC. S cílem zkoumat konformní kontakt byla na povrchu kuličky vytvořena rovinná plocha o průměru 4,7 mm a drsnosti 0,01 μm .



Obr. 2-7 (a) Schéma konfigurace měření (b) obrázek měřicího zařízení (c) obrázek kontaktní plochy pinu [10]

Jako vzorky byly použity disky z tvrzené ocele H-13 s tvrdostí 60 R_c, které měly průměr 50 mm a tloušťku 10 mm. Autor použil pro modifikaci povrchu technologii

LST, pomocí které vytvořil pravidelné vtisky na 6 použitých vzorcích. Disky (a) a (b) měly povrch bez vtisků a sloužily především pro porovnání výsledků. Po modifikaci povrchů se provedlo lapování pro dosažení dané drsnosti mezi vtisky. Na Obr. 2-8 jsou znázorněny povrchové struktury jednotlivých disků. Experimenty byly postupně provedeny při stupňovitěm zatížení (0,16, 0,4, 0,8 a 1,6) MPa a rostoucí kluzné rychlosti z hodnoty $0,015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, až do maximální rychlosti $0,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Kontakt probíhal za přítomnosti komerčně dostupného oleje na bázi PAO (Mobil-1) s rozdílnými kinematickými viskozitami (54,8 cSt a 124,7 cSt při teplotě 40°C).

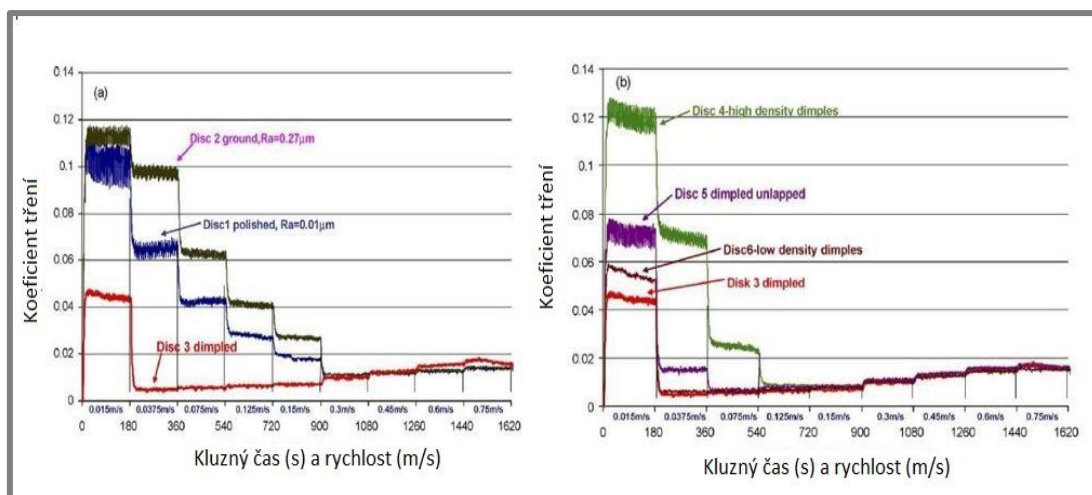


Obr. 2-8 Povrchové struktury testovaných vzorků [10]

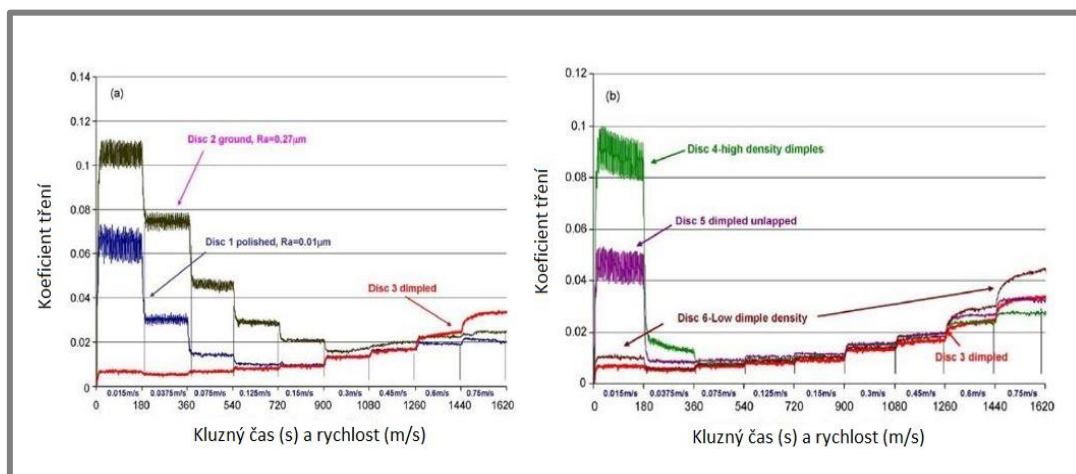
Tab. 2-1 Geometrie vtisků u jednotlivých vzorků

Parametr	Disk (a)	Disk (b)	Disk (c)	Disk (d)	Disk (e)	Disk (f)
Hloubka vtisků (μm)	-	-	5,5	5	6,5	4
Drsnost povrchu mezi vtisky R_a (μm)	0,01	0,12	0,03	0,06	0,07	0,09
Průměr vtisků (μm)	-	-	78	58	80	58
Vzdálenost mezi vtisky (μm)	-	-	200	80-100	200	200
Hustota vtisků (%)	-	-	12	15	12	7

Výsledky popsaného experimentu jasně ukázaly, že použitím vhodné struktury povrchu lze dosáhnout značného snížení koeficientu tření v olejích s nízkou (Obr. 2-9), ale i vysokou viskozitou (Obr. 2-10). Ke snížení koeficientu docházelo zejména při nižších otáčkách. Autor zde poukázal na možné rozšíření rozsahu hydrodynamického mazacího režimu pomocí cílené modifikace povrchu. Studie rovněž ukázala na fakt, že pro ideální funkci vtisků je nutný jejich ideální tvar a je tedy potřeba dokonalé odstranění výčnělků na okrajích důlků po LST. Při nedokonalém odstranění došlo naopak k navýšení koeficientu tření, k čemuž rovněž došlo při vytvoření příliš velké hustoty důlků.



Obr. 2-9 Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti pro testované vzorky v oleji s nízkou viskozitou; (a) Disk 1 - leštěný povrch bez vtisků (modrá), Disk 2 - neleštěný povrch bez vtisků (tmavě zelená), Disk 3 - standardní LST (červená); (b) Disk 4 - vysoká hustota vtisků (zelená), Disk 5 - standardní LST bez lapování (fialová), Disk 6 - nízká hustota vtisků (tmavě červená), Disk 3 - standardní LST (červená) [10]

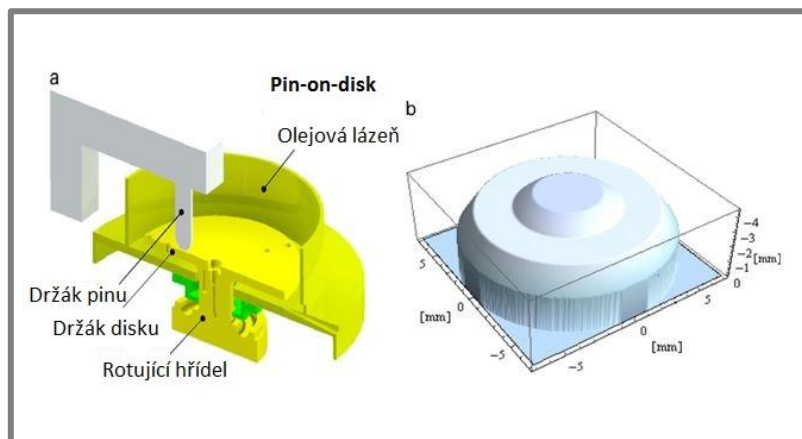


Obr. 2-10 Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti pro testované vzorky v oleji s vysokou viskozitou; (a) Disk 1 - leštěný povrch bez vtisků (modrá), Disk 2 - neleštěný povrch bez vtisků (tmavě zelená), Disk 3 - standardní LST (červená); (b) Disk 4 - vysoká hustota vtisků (zelená), Disk 5 - standardní LST bez lapování (fialová), Disk 6 - nízká hustota vtisků (tmavě červená), Disk 3 - standardní LST (červená) [10]

Podobným tématem se rovněž zabýval **Scaraggi** [9], který ve své studii zkoumal třecí vlastnosti mazaných mikro-texturovaných povrchů. Pro experimenty použil vzorky s povrchy pokrytými čtvercovými mřížkami vtisků, jejichž rozměry a vzájemná vzdálenost byly důkladně kontrolovány a vytvořeny pomocí technologie LST. Pro zjištění optimálních rozměrů vtisků k dosažení co nejlepších výsledků obsahoval každý vzorek stejné množství vtisků, ale s rozdílnými hloubkami a průměry.

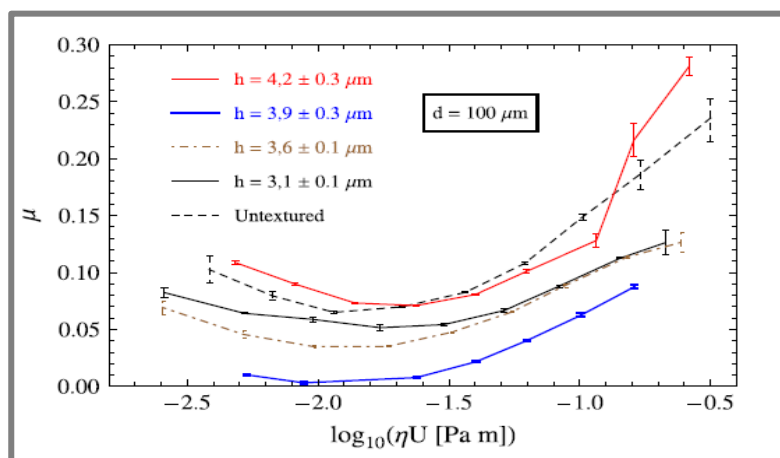
Měření tření bylo provedeno na CSM High Temperature pin-on-disk tribometru (Obr. 2-11) při kluzné rychlosti, která se pohybovala v rozmezí smíšeného až hydrodynamického mazacího režimu. Pro realizaci kontaktu působila seříznutá ocelová kulička z materiálu 100Cr6, s broušeným povrchem k dosažení drsnosti

v řádech nanometrů, na rotující disk. Kontakt probíhal za přítomnosti 110 ml čistého minerálního oleje (Oroil Thern 7) o dynamické viskozitě $\eta = 0,0516 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (při teplotě 50°C). Všechny rozměry textur byly během procesu tvorby neustále kontrolovány k zajištění konstantní hustoty texturované oblasti $p_h = \pi \cdot d^2 / (4 \cdot i^2) = 0,31$ (i – rozteč mezi texturami, D – průměr textury), která je v souladu s optimální hodnotou, uvedenou v literaturách, k dosažení minimálního tření a maximální únosnosti. Proměření každého vzorku probíhalo vždy 3 minuty. Před každým testem se provedlo přehřátí oleje na teplotu 30°C a výsledný koeficient tření byl poté získán jako rozdíl součinitele tření naměřeného během testu a odporu olejové lázně na držák pinu.

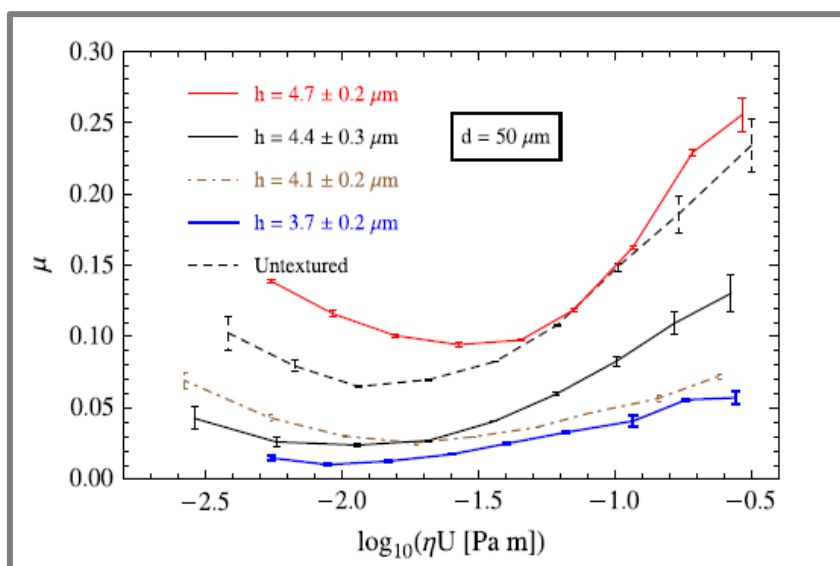


Obr. 2-11 a) Pin-on-disk tribometr, b) pin z ocelové kuličky [9]

Na následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty koeficientu tření (μ) na základě vztahu mezi viskozitou (η) a klznou rychlostí (U) pro vtisky o velikosti průměru $100 \mu\text{m}$ (Obr. 2-12) a $50 \mu\text{m}$ (Obr. 2-13). Z výsledků jasně vyplynula závislost koeficientu tření na hloubce vtisků. U vtisků s průměrem $100 \mu\text{m}$ se nejnižší hodnoty koeficientu tření dosáhlo při optimální hloubce $3,9 \mu\text{m}$, která minimalizovala tření v celém rozsahu rychlosti. U vtisků s průměrem $50 \mu\text{m}$ se nejnižších hodnot tření dosáhlo při hloubce $3,7 \mu\text{m}$. U ostatních hloubek textur naopak docházelo k výraznému navýšení koeficientu tření.

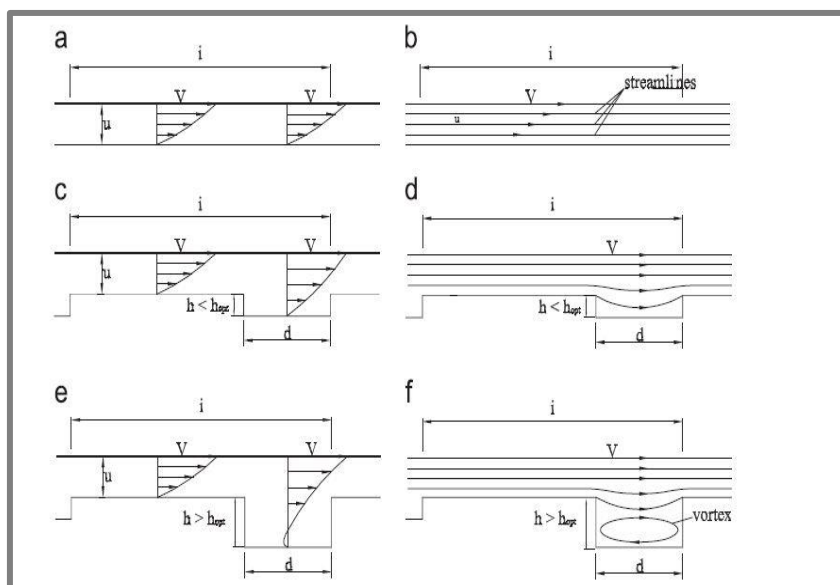


Obr. 2-12 Hodnoty tření v závislosti na vztahu mezi viskozitou a klznou rychlostí pro vtisky o průměru $100 \mu\text{m}$ [9]



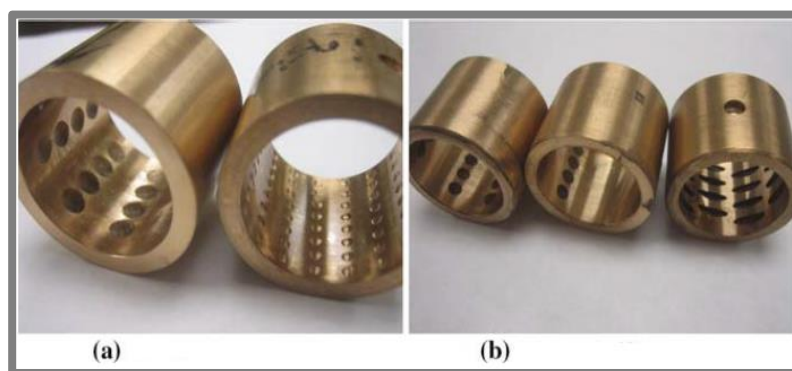
Obr. 2-13 Hodnoty tření v závislosti na vztahu mezi viskozitou a klznou rychlostí pro vtisky o průměru 50 μm [9]

Autor uvádí možnost vysvětlení poklesu tření v důsledku kavitace. Na Obr. 2-14 jsou shrnuty různé možnosti vlivu hloubky důlků na průběh maziva v kontaktu. V případě netexturovaného povrchu (a,b) je průběh maziva a proudnic téměř rovnoběžný a dochází ke vzniku smykového napětí na povrchu. Při aplikování textur s hloubkou $h < h_{\text{opt}}$ (c,d) nastává zvýšení tloušťky maziva ($h + u$), což vede ke snížení smykového napětí a tím i koeficientu tření. Při hloubkách textur $h > h_{\text{opt}}$ (e,f) došlo v místě dutiny k vytvoření víru a lze tak očekávat navýšení smykového napětí.



Obr. 2-14 Vliv hloubky důlků na průtok maziva kontaktem [9]

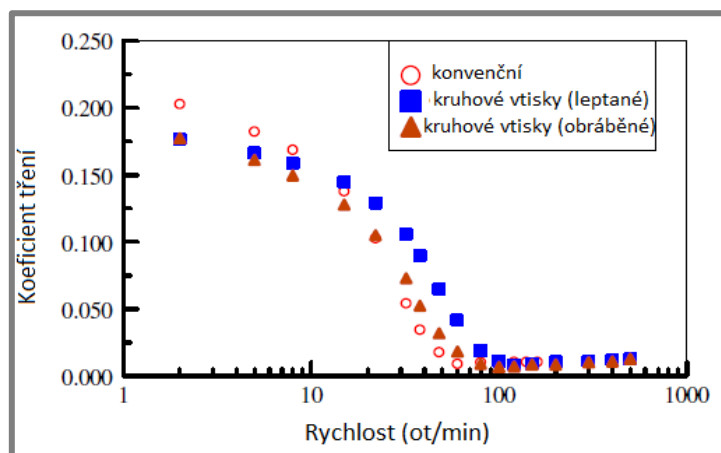
Experimentálním studiem vlivu cílené modifikace povrchu na vlastnosti mazaných kontaktů strojních součástí se zabýval **Xiaobin** [11], který svoji pozornost soustředil na studii výkonu tření kluzných ložisek s texturovanými pouzdry. K měření koeficientu tření použil tribometr Lewis LRI-8H, u kterého je hřídel poháněna elektrickým motorem a zatížení je vyvozeno závažím umístěným na páce. Test ložisek trval přibližně 12 hodin při zatížení 445 N a rychlosti $300 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Testovaná pouzdra (Obr. 2-15) ze slitiny bronzu SAE660 byla pro porovnání texturována dvěma způsoby (obrábění a chemické leptání). Obráběná pouzdra obsahovala kruhové vtisky o průměrech 2 a 4 mm. U leptaných pouzder měly vtisky kruhový a eliptický tvar o průměru 4 mm a pokrývaly buď celý vnitřní povrch (360°) nebo pouze jeho polovinu (180°).



Obr. 2-15 a) obráběná pouzdra, b) leptaná pouzdra [11]

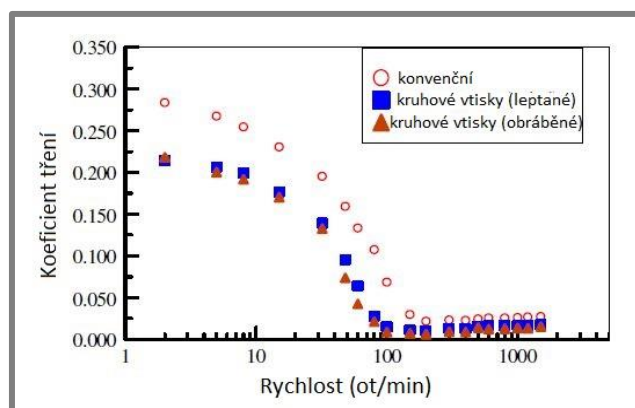
Studie prezentovala výsledky na základě dvou použitých olejů, SAE30 (viskozita 93 cSt při teplotě 40°C) a olej GT32 s nižší viskozitou (31,3 cSt při teplotě 40°C). Oba oleje vstupovaly do kontaktu při teplotě 40°C .

U oleje s vyšší viskozitou (Obr. 2-16) docházelo k mírnému snížení tření u vtisků s průměrem 4 mm. U vtisků s průměrem 2 mm se nepodařilo vytvořit dodatečný hydrodynamický tlak, nebo nedocházelo k poskytování dostatku maziva ze zásobníků k nahrazení jeho ztráty v kontaktní oblasti. K mírnému snížení tření docházelo pouze při nižších rychlostech otáčení. Při vyšších rychlostech se hodnoty spíše zhoršovaly.



Obr. 2-16 Koefficient tření v závislosti na otáčkách (zatížení 667 N, olej SAE30) [11]

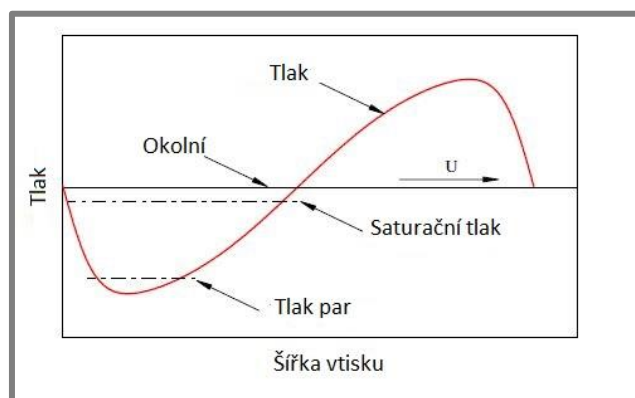
Při použití oleje s nižší viskozitou (Obr. 2-17) už bylo docíleno mnohem lepších výsledků. Ke snížení hodnoty koeficientu tření docházelo v celém průběhu experimentu, a to jak u leptaných vtisků, tak i u vtisků vytvořených obráběním. Nejlepších výsledků bylo dosaženo v hydrodynamickém režimu mazání u pouzder s mechanicky vytvořenými texturami. Např. koeficient tření o velikosti 0,195 3 (konvenční pouzdro) klesl na hodnotu 0,138 8 (leptané pouzdro) a 0,132 5 (obráběné pouzdro), při rychlosti 32 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a zatížení 667 N. Z důvodu nižší viskozity mohl olej lépe proudit do vtisků, které fungovaly jako sekundární zdroj maziva dodávající olej do kontaktu, čímž docházelo ke snížení hodnoty tření. Modifikace povrchů může tedy výrazněji snížit hodnoty tření u olejů s nižší viskozitou.



Obr. 2-17 Koeficient tření v závislosti na otáčkách (zatížení 667 N, olej GT32) [11]

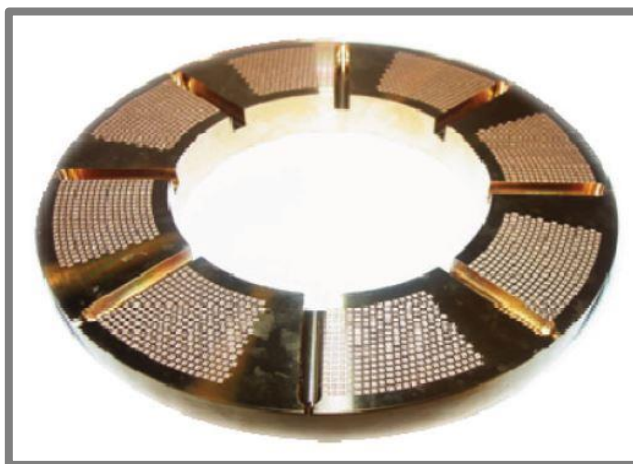
Ve smíšeném režimu mazání pouzdra s vtisky po celé vnitřní ploše (360°) dosahovala lepších výsledků než pouzdra s polovičním množstvím vtisků (180°). V hydrodynamickém režimu mazání se výsledky téměř nelišily.

Autoři zde vysvětlují navýšení hydrodynamického tlaku v oblasti hydrodynamického mazacího režimu v důsledku asymetrického rozložení tlaku (Obr. 2-18) v oblasti textury. Nachází se zde negativní tlak v rámci divergentní oblasti a pozitivní tlak v konvergentní oblasti. Bez kavitace se podtlak a přetlak navzájem vyruší. Avšak v důsledku uvolňování plynu při proudění maziva nemůže být podtlak nižší než tlak páry nebo saturační tlak.



Obr. 2-18 Rozložení tlaku ve vtisku po směru toku [11]

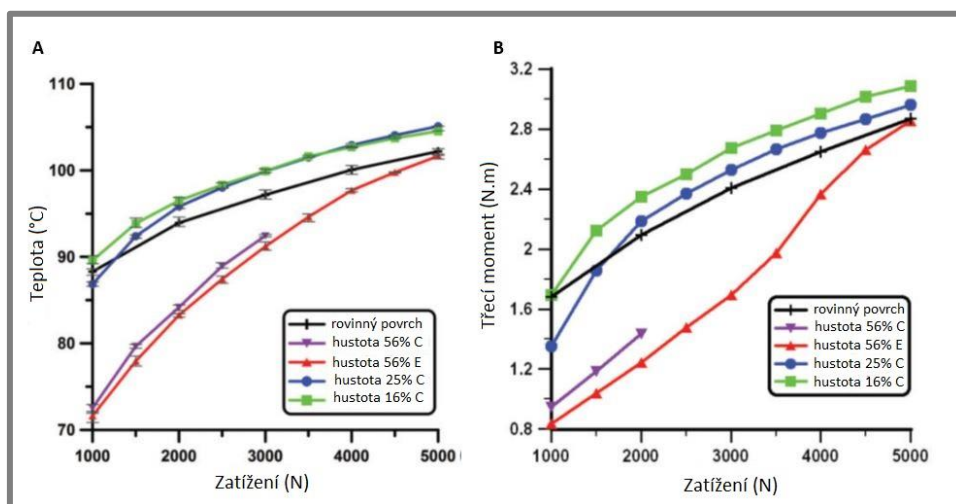
Mnohem podrobněji se studiem texturovaných ložisek zabýval **Henry** [12], který se ve své studii zaměřil na ověření teoretického chování částečně texturovaných axiálních ložisek v reálných provozních podmínkách. K dosažení daného cíle použil pro měření experimentální přístroj vybavený 80 čidly, které umožnily měřit třecí moment, minimální tloušťku filmu, teplotu a tlak v kontaktu. V průběhu experimentu byly rovněž důkladně kontrolovány základní provozní podmínky umožňující přesné nasimulování provozního stavu ložisek. Jednalo se zejména o otáčky (2000 až 10000) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a nominální tlak ($0,25$ až $1,25$) MPa. Testy byly provedeny na 5 axiálních ložiscích z bronzu UE9P, texturovaných prostřednictvím nanolaserové technologie a obsahovaly vtisky čtvercového tvaru o hloubce $20 \mu\text{m}$ (Obr. 2-19). Celý experiment probíhal za přítomnosti minerálního oleje ISO VG 46, dodávaného do ložisek při teplotě 40°C a tlaku $0,1$ MPa.



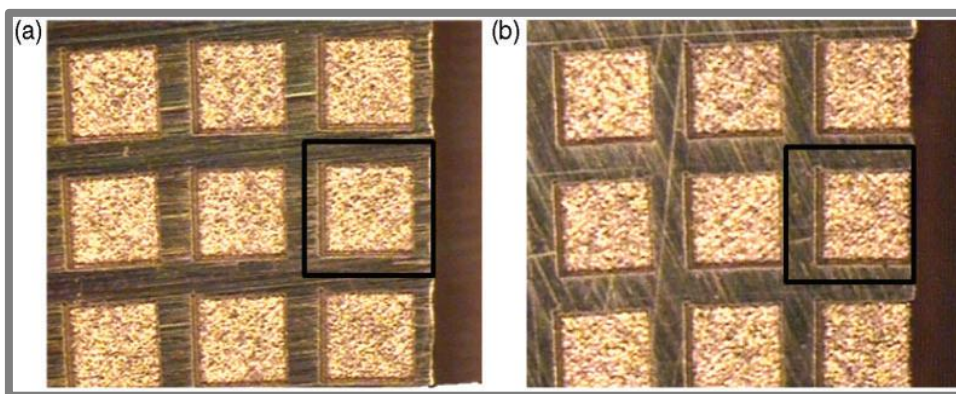
Obr. 2-19 Texturovaný kroužek axiálního ložiska [12]

Autor na základě výsledků poukázal na výrazné snížení teploty u vzorků s největší hustotou vtisků (Obr. 2-21-A). Rozdíl oproti netexturovanému ložisku dosahoval až 24 K . Nejvyšší hustota textur (56%) rovněž vedla ke značnému snížení třecího momentu (Obr. 2-21-B) a zvýšení únosnosti, která však stoupla pouze za nízkého zatížení. Při aplikování vyššího zatížení docházelo k opačnému efektu. Celkově u vzorků s nižšími hustotami textur (16% nebo 25%) docházelo k horším výsledkům než u běžného ložiska bez vtisků.

Ze studie vyplynul velmi důležitý poznatek týkající se umístění první řady vtisků vůči hraně buňky (Obr. 2-20), ve které se daný vtisk nachází. Poloha této řady může výrazně ovlivnit tribologické chování a jejím umístěním na hranu buňky došlo ke zlepšení výkonu ložiska z důvodu navýšení průtoku maziva na náběžné hraně kontaktu.



Obr. 2-21 A-závislost teploty na zatížení jednotlivých vzorků, B-závislost třecího momentu na zatížení jednotlivých vzorků [12]



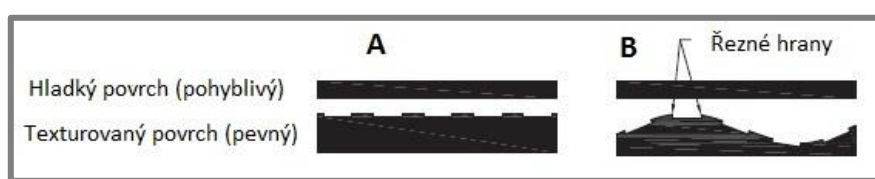
Obr. 2-20 (a) umístění vtisku uprostřed buňky, (b) umístění vtisku na hraně buňky [12]

Další, kdo se danou problematikou zabýval, byl **QIU** [13], který se snažil objasnit nejen souvislost mezi texturovaným povrchem a třením, ale rovněž se zaměřil i na změny z hlediska opotřebení. Experimenty byly provedeny na vzorcích z nerezové oceli, kde netexturovaný rotující vzorek působil na stacionární vzorek opatřený vtisky kruhového a eliptického tvaru vytvořených technologií LST. Autor se ve své práci zabýval dvěma typy testů. Při prvním z nich se snažil zkoumat kavitaci vyskytující se ve vytvořených vtiscích. K danému účelu využil rotující disk z plexiskla, prostřednictvím kterého s využitím vysokorychlostní kamery pozoroval kavitační procesy při zatížení 4,5 N a rostoucí rychlosti otáčení (10, 20, 40, 80, 100, 200, 400 a 800) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. U druhého typu testu zjišťoval hodnoty tření při postupném navyšování zatížení (4 až 36) N a klesající rychlosti otáčení (1000 až 5) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Autor dospěl k výsledkům, že vznik a rozvoj kavitace jsou vysoce závislé na rychlosti otáčení. Při nižších rychlostech (méně než 40 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$) ke vzniku kavitace v žádném z důlků nedocházelo. U vyšších otáček (40 až 800) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ se však kavitace už objevovala a velikost bublin se postupně navyšovala s rostoucí rychlostí otáčení. V průběhu maximálních otáček (více než 800 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$) docházelo uvnitř důlků k výraznému míchání maziva.

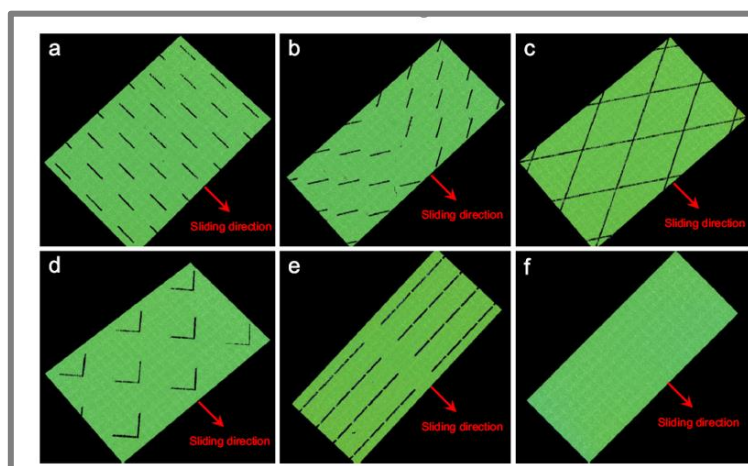
Z hlediska tření se u hladkých vzorků dosahovalo větších hodnot než u vzorků opatřených vtisky, a to zejména při nižších zatíženích. Docházelo zde však i ke značným opotřebením. Autor uvádí jako možnou příčinu tepelnou roztažnost použitého materiálu kolem vytvořených důlků nebo deformaci povrchu. Během experimentů může na povrchu vzorků dojít, mechanicky nebo tepelně, ke vzniku zvlnění (Obr. 2-22). Okraje důlků na povrchu zvlnění pak mohou působit jako „řezné hrany“ a zarávat se do dosedací plochy. Z daných poznatků autor odvodil skutečnost, že vzorky při daných experimentech nepracují v plném filmu maziva.

Studie rovněž poukazuje na skutečnost, že pro dosažení nejlepších výsledků je nutná vhodná volba několika parametrů. Jedná se zejména o poměr hloubky k průměru vtisku, tvar vtisku a důležitá je také hustota, kde u vyšších hodnot hustoty textur bylo dosaženo mnohem příznivějších výsledků.



Obr. 2-22 Povrch bez zvlnění (A) a se zvlněním (B) [13]

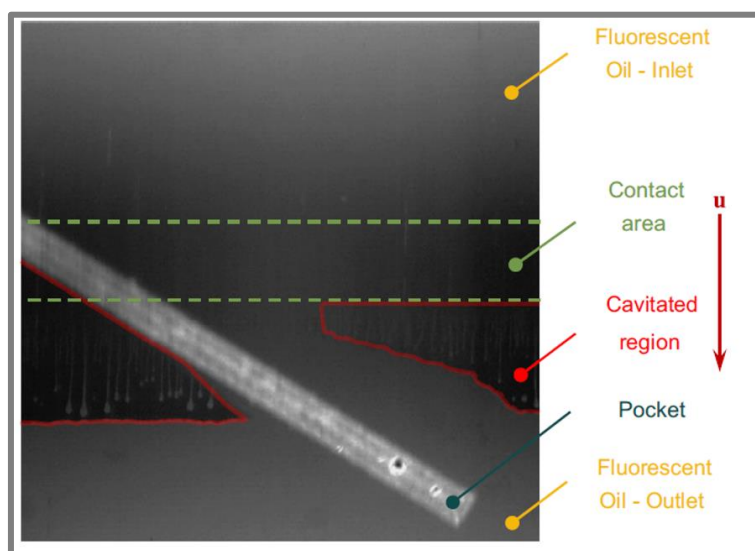
S.-C. Vladescu [14] ve své práci zkoumal nejen vliv texturovaných povrchů na hodnoty tření, ale rovněž se věnoval i vyhodnocování tloušťky maziva a kavitačního chování pomocí optiky. Autorovým cílem bylo v dané studii objasnit chování v kontaktu mezi vložkou a horním kroužkem pístu v motoru. Jako vzorek byla použita konvexní ocelová podložka z materiálu AISI 52100 o šířce 2 mm, na kterou působil vzorek simulující vložku válce opatřeného různými tvary vtisků (Obr. 2-23). Obě testované části mezi sebou konaly reciproční pohyb. Podložka byla zakřivená s rádiusem 40 mm ve směru posuvu, což vedlo ke sbíhavé konvergenci. Vzorek simulující vložku válce byl vyroben z materiálu HPFS Standard Grade s modulem pružnosti 72,7 GPa a výbornými optickými vlastnostmi. K mazání byl použit olej SAE 40 a během měření byla velmi pečlivě kontrolována jeho teplota. K měření kavitačních procesů a tloušťek mazacího filmu byla využita laserem indukovaná fluorescence.



Obr. 2-23 Odlišné tvary vytvořených vtisků [14]

Ze získaných výsledků vyplynulo, že u kontaktů s nízkou tloušťkou filmu maziva lze pomocí texturovaného povrchu docílit značného snížení tření po celé délce zdvihu. V průběhu mezního režimu došlo vlivem vtisků ke snížení tření až o 50 %. Vzorky s drážkami orientovanými kolmo ke směru pohybu vykazovaly nejlepší výkon, avšak u vtisků tvaru drážek rovnoběžných se směrem pohybu docházelo ke zhoršení výsledků po celé délce Stribeckovi křivky ve srovnání s hladkým vzorkem. V plném režimu mazání se dosahovalo nejnižších hodnot tření u vzorku bez textur. Avšak textura pomohla snížit tření v krátké vzdálenosti od bodu obrácení cyklu. Rovněž autor dospěl k závěru, že orientace vtisků je důležitá, pokud jsou vtisky větší než šířka kontaktu, jelikož mohou při určitém tvaru umožnit únik stlačeného maziva.

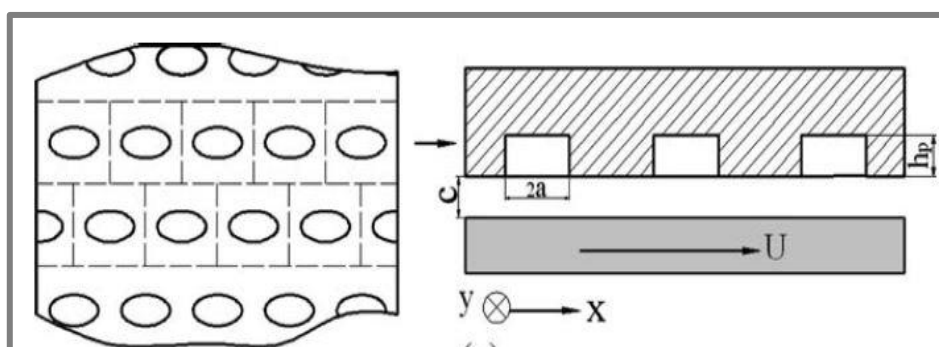
Na následujícím obrázku (Obr. 2-24) je zobrazen fluorescenční obraz vtisku, který prochází kontaktem. Je zřejmé, že jakmile textura vystupuje z kavitované oblasti, dochází k opětovnému vrácení maziva. Dané výsledky tedy naznačují, že při plném mazacím režimu, kdy je tření způsobeno stříháním maziva, bude vlivem vtisků docházet k vyššímu tření v důsledku většího množství stříhů maziva. Oproti tomu ve smíšeném a mezním režimu může kavitovaná oblast snížit přítlak maziva ihned po obrácení cyklu. Proto vtisky, které přivádějí olej do kavitované oblasti, mohou pomoci zachytit mazivo a snížit tření.



Obr. 2-24 Vtisk procházející kontaktem [14]

2.5.2 Teoretické studie

Z předešlých studií jasně vyplynul poznatek, že pro dosažení nejnižších hodnot tření je nutná vhodná volba tvaru a geometrie použitých vtisků. Daným problémem se zabýval **Haiwu Yu** [15], který se ve své práci snažil, využitím numerického modelu, objasnit vliv geometrického tvaru a orientace vtisků na hydrodynamický tlak generovaný v kontaktu konformně zakřivených povrchů. Na Obr. 2-25 je možné vidět použitý model styku dvou desek. Dolní deska je hladká a pohybuje se relativní rychlostí U vůči horní desce opatřené vtisky uspořádané do pravidelné sítě. Pro zjištění hydrodynamického tlaku generovaného mezi těmito plochami se desky od sebe oddělily na vzdálenost vůle C . Numerický model byl vytvořen na základě ustálené Reynoldsovy rovnice (4) pro zkoumání pouze jednoho důlku. Studovány byly vtisky různých tvarů (Obr. 2-26), u kterých se rovněž zjišťoval vliv orientace vůči toku maziva. Pro získání optimální geometrie měly všechny vtisky stejné rozměry.



Obr. 2-25 Model pro analytické řešení [15]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

kde:

x a y

p

h

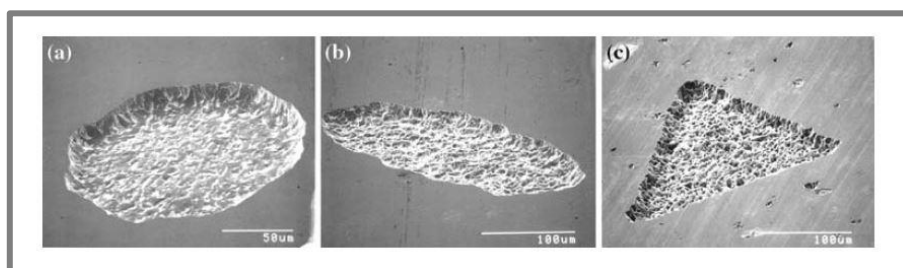
U

souřadnice v globálním kartézském systému

tlak filmu maziva

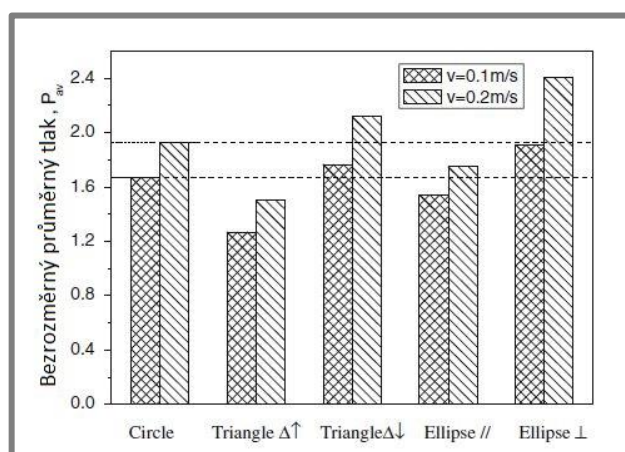
lokální tloušťka filmu

unášivá rychlost



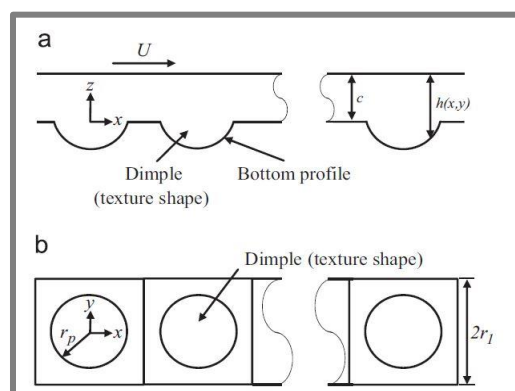
Obr. 2-26 (a)-vtisk tvaru kruhu (b)-vtisk tvaru elipsy (c)-vtisk tvaru trojúhelníku [15]

Z výsledků vyplynulo, že u všech testovaných tvarů docházelo ke generování hydrodynamického tlaku, a to zejména při vyšší skluzové rychlosti (Obr. 2-27). Čím vyšší jsou hodnoty hydrodynamického tlaku, tím má kontakt mnohem vyšší únosnost a nedochází tak ke styku jednotlivých povrchů, což by vedlo ke zvýšení tření. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vtisku tvaru trojúhelníku, kdy mazivo procházelo kolmo na jeho spodní hranu a u vtisku tvaru elipsy, kdy mazivo proudilo kolmo na hlavní osu elipsy. Hodnoty se zde v porovnání s kruhovým vtiskem zlepšily až o 26 %. Při opačné orientaci textur naopak hodnoty v porovnání s kruhovým tvarem klesly. Autor zde poukazuje na to, že daný model byl vytvořen pouze pro jeden vtisk a je tak potřeba v budoucnu provést studie pro řadu vtisků.



Obr. 2-27 Průměrný generovaný tlak pro odlišné tvary a orientace textur pro dvě různé skluzové rychlosti [15]

Numerickou analýzou řady důlků se zabýval **Mingfeng Qiu** [16], který se věnoval vyhodnocení koeficientu tření a tuhosti texturovaných plynem mazaných posuvných ložisek na základě šesti různých tvarů vtisků. Ve své studii využil analytický model (Obr. 2-28) pracující na základě stlačeného a ustáleného stavu Reynoldsovy rovnice pro sloupec 10 vtisků. Autor nejprve provedl optimalizaci jednotlivých tvarů vtisků pro dosažení minimálního koeficientu tření a maximální tuhosti ložiska a následně všechny tvary porovnal mezi sebou. Analýza byla provedena u plně texturovaných vzorků za předpokladu hydrodynamického mazání, kdy mazivem byl vzduch při pokojové teplotě.

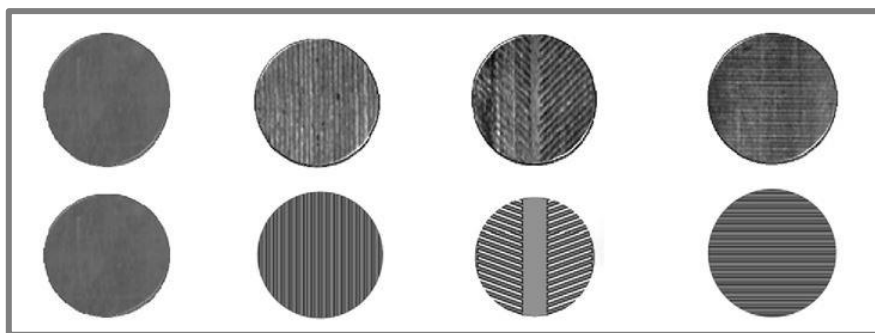


Obr. 2-28 Analytický model (a-pohled z boku, b-pohled ze shora) [16]

Autor porovnával 6 běžně používaných tvarů textur, včetně 4 tvarů s plochým dnem (kruhové, eliptické, trojúhelníkové a šípové) a dvou tvarů se zakřiveným dnem (sférické a elipsoidní). Pro popis geometrie textur použil bezrozměrné parametry, mezi které patří: poměr stran vtisku ε (poměr hloubky a charakteristického průměru textury), hustota vtisků Sp (poměr plochy pokryté texturou a celkové plochy buňky, ve které se vtisk nachází), poměr ploch K pro šípový tvar a dva poměry stran ε_1 a ε_2 pro eliptické a elipsoidní tvary.

Autor zde dospěl k obdobným závěrům jako **Haiwu Yu** [15]. Z výsledků jasně vyplynul poznatek, že pomocí elipsoidního tvaru textury lze dosáhnout značného snížení koeficientu tření a navýšení tuhosti ložisek např. oproti kruhovým tvarům. U vtisků se zakřiveným dnem vycházely rovněž příznivější výsledky než u textur s plochým dnem. Autor uvedl ve studii poznámku, že ačkoli pro elipsoidní tvary jsou výsledky nejpříznivější, tak sférické tvary jsou mnohem efektivnější z hlediska výroby.

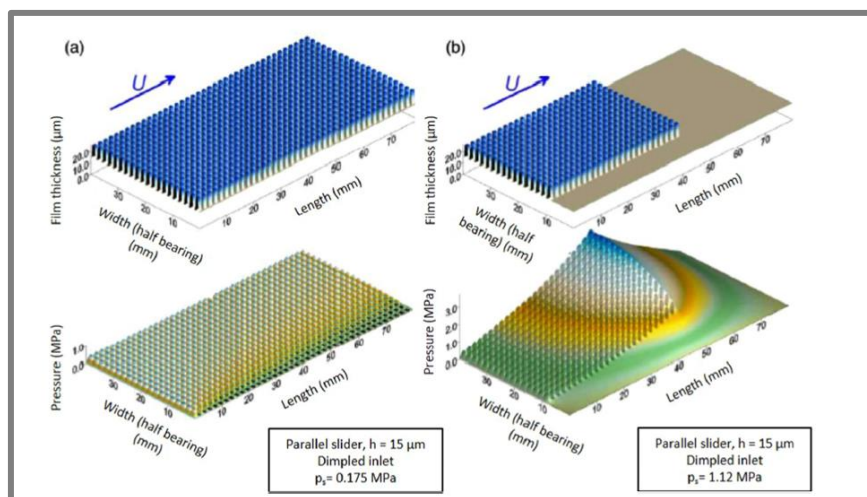
Hakan Adatepe [17] provedl porovnání dynamicky zatěžovaných rýhovaných a nerýhovaných kluzných ložisek na základě numerické a experimentální studie, využitím laboratorního zařízení pro zjišťování tribologického chování dynamicky namáhaných ložisek motoru. Autor porovnával 3 různé směry rýh (Obr. 2-29) s hloubkou přibližně $30\text{ }\mu\text{m}$, při rychlostech otáčení $1240\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 2-29 Použité směry rýh [17]

Výsledky studie ukázaly výrazné zvýšení třecí síly a koeficientu tření u všech aplikovaných tvarů drážek oproti hladkému ložisku bez úprav. Obdobné výsledky byly zjištěny i pomocí numerických simulací. Autor poukázal na skutečnost, že využití obecných závěrů bez ohledu na tvar drážek a provozních podmínek může vést k chybným odhadům tribologických vlastností, a je tedy nutné provádět důkladné studie s ohledem na dané parametry.

Dobrica [18] došel pomocí algoritmů řešící kavitaci k závěru, že u plně texturovaných paralelních kluzných ložisek nedochází vlivem textur ke generování zdvihu, jelikož byla kavitace přítomna ve všech vtiscích. K mírnému navýšování zdvihu však docházelo, pokud byly vtisky umístěny přímo na vstupu. Autor v dané práci uvádí, že pozitivní účinky povrchových textur při podobných podmínkách v ostatních pracích jsou způsobeny nedokonalostí kavitačních algoritmů, které nezajišťují masovou konvergenci. Dalším důležitým poznatkem vyplývajícím z dané práce jsou mnohem lepší dosažené výsledky u částečně texturovaných povrchů, než u povrchů plně pokrytých (Obr. 2-30).



Obr. 2-30 Tloušťka maziva a hodnoty tlaku získané pomocí algoritmů u: (a) plně texturovaných povrchů; (b) částečně texturovaných povrchů [18]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

S cílem zkoumat kontakt konformně zakřivených těles je nutná vhodná volba experimentálního zařízení. K dosažení stabilních podmínek hydrodynamického mazání je potřeba použít tělesa s blízkými poloměry křivosti a zabezpečit dobré ustavení vzorků pro zajištění rovnoměrného zatížení po šířce. K dosažení daných podmínek bude nutná úprava stávajícího tribometru umístěného na Ústavu konstruování. Využitím block-on-ring RTEC tribometru je možné k dosažení konfigurace kluzného ložiska namísto bloku použít kruhovou úseč, avšak je tím omezeno měření tření, které je obvykle realizováno tečně umístěným snímačem na bloku. Pak se tedy nabízí měření třecího momentu snímačem přímo na hřídeli, obvykle pak dochází i k měření tření podpůrných ložisek.

Jelikož doposud většina studií využívala k pozorování funkcí vtisků v oblasti konformních kontaktů tribometry typu pin-on-disk, není tak možné na základě rešerše zvolit vhodné parametry textury, u kterých by byl ověřen pozitivní vliv na výsledné hodnoty u námi použité konfigurace (block-on-ring) a provozních podmínek. Z daného důvodu budou stanoveny určité parametry vtisků (na základě studií s odlišnou konfigurací) a u nich bude pozorován a hodnocen jejich vliv na výsledné hodnoty, ať už je pozitivní nebo negativní.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z provedené rešeršní části práce vyplynulo, že studie, které se zabývaly konfigurací kluzných ložisek, jsou většinou numerického charakteru a jen některé z nich se věnují experimentálnímu ověření. Autoři studující kontakt konformně zakřivených těles nejčastěji využívají tribometry typu pin-on-disk, které jsou vhodné pro testování axiálních ložisek a rovinných kluzných kontaktů. Pro konfiguraci kluzných ložisek však nejsou tyto tribometry vhodné, jelikož u nich dochází k flat-to-flat kontaktu a není zde docíleno konvergentně/divergentní geometrie kontaktních těles.

Z první části rešerše je zřejmé, že vtisky jsou v dnešní době nejčastěji vytvářeny technologií LST, která umožňuje velmi snadno kontrolovatelnou a přesnou výrobu. Je však nutná optimalizace pulsních parametrů, aby nedocházelo ke vzniku příliš velké tepelně ovlivněné oblasti. Důležité je také dostatečné závěrečné opracování k odstranění přebytečného materiálu v okolí vtisků.

Téměř všechny studie se shodují na závěru, že vhodnou optimalizací základních parametrů vtisků (průměr, hloubka a hustota vtisků na povrchu) pro dané provozní podmínky lze docílit značného snížení hodnot tření. Příčinu snížení tření většina autorů přikládá vzniku kavitace v jednotlivých vtiscích, čímž dochází k asymetrickému rozložení tlaku a následnému navýšení hydrodynamického tlaku v mazaném kontaktu. Na výsledek má však značný vliv hloubka vtisků. V případě příliš velké hloubky může naopak dojít k vytvoření víru a koeficient tření se bude zvyšovat. Na rozvoj kavitace má také vliv rychlost otáčení, kde při příliš nízkých rychlostech ke vzniku kavitace vůbec nedochází, a naopak příliš vysoké rychlosti vedou ke vzniku víření a následnému zhoršení výsledků. Další důležitý poznatek plynoucí z provedených studií je umístění první řady vtisků vůči buňce, ve které se daný vtisk nachází. Poloha dané řady může značně zvýšit výkon ložiska na základě navýšení průtoku maziva na náběžné hraně kontaktu.

Všechny studie se shodují na nutnosti optimalizace tvaru a geometrie vytvářených textur k dosažení co nejlepších výsledků. Nejnižší hodnoty tření lze získat pomocí elipsoidních vtisků, ale z hlediska výroby se jeví jako nejlepší volba vtisky kruhového tvaru. U jiného, než kruhového tvaru je také nutné zvolit správný směr orientace textury vůči proudu maziva.

Dosud probíhaly veškeré studie bez možnosti přímého vhledu do kontaktu a často tak autoři nebyli schopni přesně určit, v jakém mazacím režimu jejich experiment probíhá a určovali to pouze na základě výsledného koeficientu tření. U řady experimentů autoři udávají cíl zkoumat vliv cílené modifikace při hydrodynamickém mazacím režimu, ale na základě značného opotřebování studovaných vzorků zjistí, že jejich test neprobíhal při plné tloušťce filmu maziva a výsledky tak není možné brát v úvahu se zkoumaným režimem mazání. Vznik a rozvoj kavitace je také pouze určován na základě teoretických studií, ale s možností vhledu do kontaktu by bylo možné kavitační procesy popsat mnohem přesněji.

Celkově z rešerše vyplynulo, že pomocí cílené modifikace povrchu lze značně přispět ke snížení tření v kontaktu konformně zakřivených těles. Pro správnou funkci při dané aplikaci je potřeba optimalizovat geometrii vytvářených vtisků pro dané provozní podmínky. Ve výzkumu je ale nutné nadále pokračovat, protože často je velice obtížné tyto parametry stanovit a bez možnosti přímého vhledu do kontaktu není možné přesně určit probíhající děje.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

3.3

Cílem diplomové práce je objasnit spojitost mezi třením a cílenou modifikací povrchu kluzného kontaktu konformně zakřivených těles využitím optického pozorování pro objasnění dějů probíhajících v daném kontaktu. K experimentům bude využit tribometr block-on-ring s konvergentně/divergentní geometrií kontaktních těles. Zejména bude tedy důležité v dané práci propojit měření tření s optickým pozorováním. Výstupem práce bude článek v odborném časopise.

Ke splnění hlavního cíle je nutné splnit dílčí cíle, jimiž jsou:

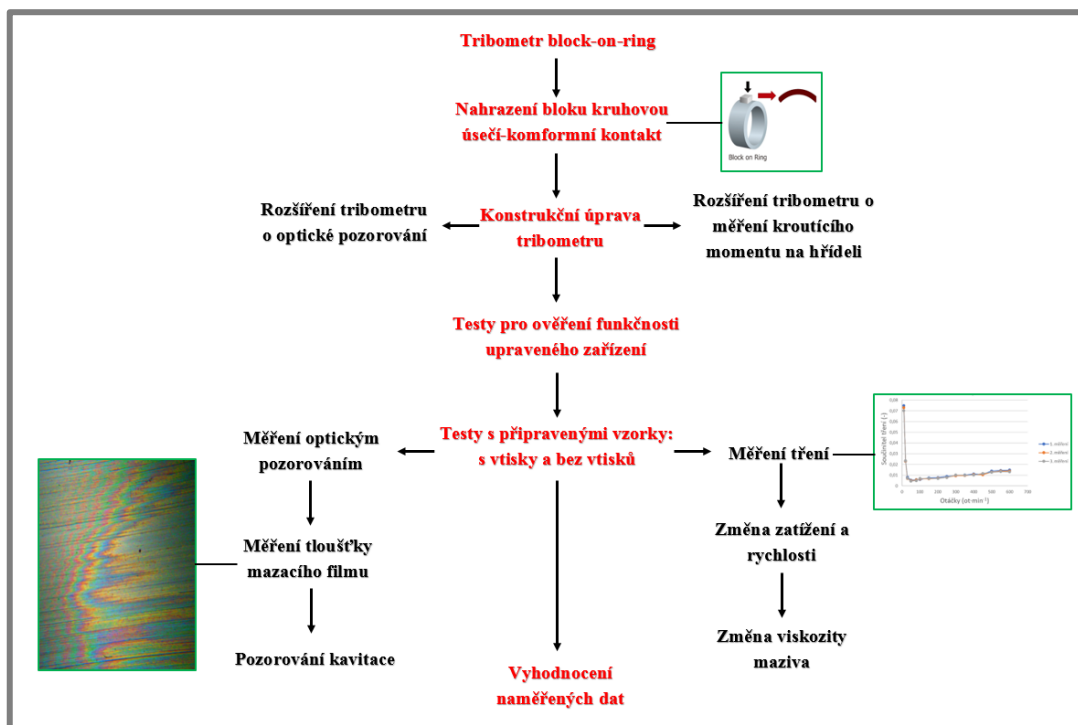
- rozšíření universálního tribometru o optické pozorování
- rozšíření universálního tribometru o snímač kroutícího momentu
- experimenty s texturovanými vzorky
- vyhodnocení výsledků

4 MATERIÁL A METODY

Tato kapitola je věnována popisu laboratorních zařízení a měřicích metod použitých při řešení dané práce. Dále jsou zde rozebrány potřebné úpravy použitých zařízení a ostatní prostředky nutné ke splnění všech cílů.

4.1 Postup řešení

Na začátku práce bylo nutné si stanovit určitý postup řešení. Zjednodušené schéma postupu je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 4-1).



Obr. 4-1 Schéma postupu práce

V první části proběhl výběr vhodného měřicího zařízení, které by umožnilo provést testování v konfiguraci kluzného ložiska. Z rešeršní části práce vyplynula nevhodnost tribometru pin-on-disk, a proto byl zvolen tribometr typu block-on-ring, který je zároveň dostupný na Ústavu konstruování. U běžně používaných block-on-ring tribometrů je kontakt realizován působením bloku na kruhový vzorek. Tato konfigurace však slouží pro testování nekonformních kontaktů. K dosažení konformního kontaktu musel být běžně používaný blok nahrazen kruhovou úsečí. Tím však bylo omezováno měření tření, které je běžně realizováno tečně umístěným snímačem na bloku. Z daného důvodu musel být stávající tribometr dovybaven snímačem momentu na hřídeli, což vyžadovalo konstrukční úpravu.

Následovalo rozšíření měřicího zařízení o optické pozorování, k čemuž byl využit safírový materiál, ze kterého se vyrobila kruhová úseč a umožnila tak prostup světelného paprsku přímo do kontaktní oblasti. Pro uchycení safírové úseče byl navržen speciální držák, který navíc obsahoval sklopené sklíčko sloužící k usměrnění světelných paprsků do místa kontaktu.

Na upraveném zařízení bylo následně provedeno několik testů pro ověření správné funkčnosti. Jednalo se zejména o testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

měření. Poté se už přešlo k testům s připravenými vzorky, které buď měly povrch opatřený vtisky a nebo byly hladké a sloužily jako referenční vzorky pro stanovení vlivu vytvořených textur na výsledné hodnoty. Měřena byla hodnota tření při různé velikosti zatížení, rychlosti a rovněž i při odlišné viskozitě maziv.

Pro provozní podmínky, u kterých měly vtisky výraznější vliv na hodnoty tření, byly dále provedeny testy s využitím optického pozorování, jejichž cílem bylo zkoumat procesy probíhající v mazaném kontaktu, které poskytnou základní informace o jednotlivých mechanismech.

Po realizaci všech experimentů se přešlo ke zpracování naměřených dat. Hodnoty tření byly zaneseny do grafů a následně propojeny s výsledky optického pozorování tak, aby bylo možné odůvodnit změny vlivem vytvořených vtisků.

4.2 Experimentální zařízení

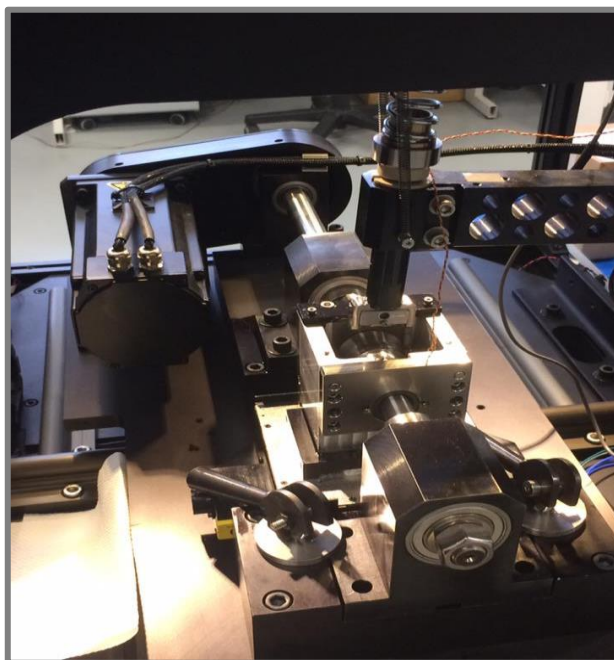
4.2

V této kapitole je podrobně rozebráno použité experimentální zařízení a provedené konstrukční úpravy nutné pro splnění cílů práce.

4.2.1 Popis měřicího zařízení

4.2.1

Veškeré měření probíhalo na univerzálním tribometru MFT (multifunctional tribometer) Rtec Instruments [19], který je umístěn na Ústavu konstruování. Na daném zařízení lze provádět rotační testy v různých konfiguracích (pin, koule, disk a další). V dané práci byl pro testování využit modul block-on-ring (Obr. 4-2), u kterého je možné navyšovat zatížení až do hodnoty 1 kN a otáčky lze měnit v rozsahu (0 až 5000) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

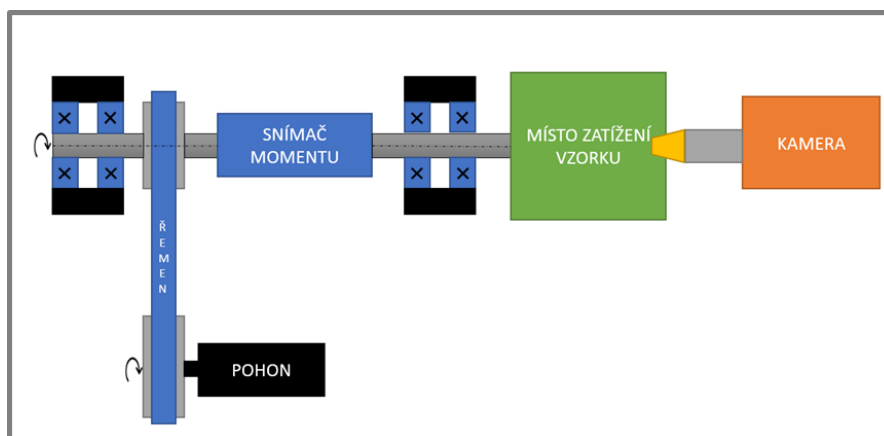


Obr. 4-2 Modul block-on-ring RTEC tribometru umístěného na Ústavu konstruování

Hlavní částí použitého tribometru je přes celý modul vedoucí hřídel, která je uložena v ložiskových domcích. Na jedné straně hřídele je umístěn pohon, který je realizován elektromotorem a ozubeným řemenem, prostřednictvím kterého je krouticí moment

přenášen na poháněnou hřídel. Na opačnou stranu hřídele se upevňují měřené vzorky, na které se přes držák uchycený v zátěžném rameni vyvozuje potřebné zatížení.

Jak už bylo řešeno v kapitole 4.1, vzhledem k nahrazení bloku kruhovou úsečí musel být použitý tribometr dovybaven snímačem kroutícího momentu, což vyžadovalo řadu úprav. Konstrukční úpravy rovněž zahrnovaly i realizaci držáku pro uchycení safiru. Navrhované umístění snímače je zobrazeno na následujícím schématu (Obr. 4-3), kde je také možné pozorovat umístění kamery pro realizaci optického pozorování.

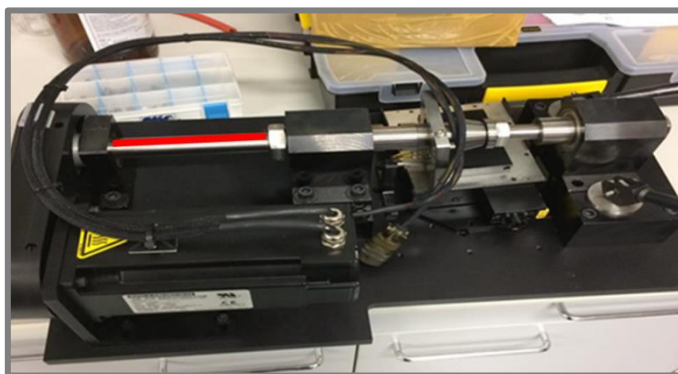


Obr. 4-3 Schéma navrhovaných úprav tribometru block-on-ring

4.2.2 Snímání hodnot tření

Pro snímání kroutícího momentu byl použit sensor FY02-1NM od firmy FORSENTEK. Daný snímač má rozsah snímaného momentu do 1 Nm a s počítačem byl propojen pomocí karty NATIONAL INSTRUMENTS s označením NIcDAQ-9174 a modulu pro převod signálu z tenzometrického můstku s označením NI 9237.

Aby bylo možné snímač do daného tribometru připevnit, musela být původní hřídel nahrazena dvěma kratšími, mezi které se použitý snímač vložil a připojil prostřednictvím vlnovcových spojek (typ MK1 series od firmy R+W do přenášeného momentu 2 Nm a otáček $20\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$) vyvážajících nesouososti hřídelí. Obě hřídele byly vyrobeny z materiálu 16MnCr5 (ocel 14 220) a následně i zakaleny. Na následujícím obrázku (Obr. 4-4) je červeně znázorněna oblast umístění snímače.



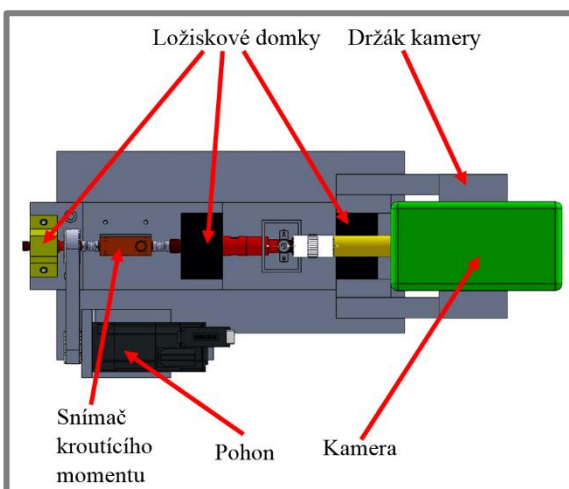
Obr. 4-4 Oblast umístění snímače momentu

Velikost snímače s použitými spojkami (Obr. 4-5) byla mnohem větší než volný prostor mezi původními ložiskovými domky. Z daného důvodu se v dalším postupu

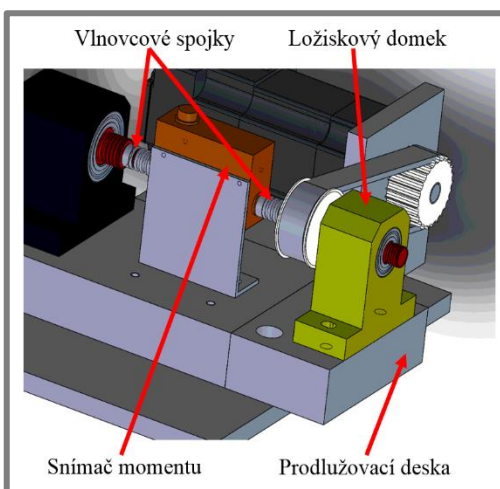
práce navrhl nový ložiskový domek, který se připevnil na prodlužovací desku, čímž se výrazně zvětšil potřebný prostor (Obr. 4-6). Ložiskový domek i prodlužovací deska byly vyrobeny z hliníku EN AW5083 s povrchovou úpravou Elox.

Jelikož se snímač nacházel za ložiskovými domky, docházelo k měření tření podpůrných ložisek. Z tohoto důvodu bylo cílem zvolit ložiska s co nejmenší hodnotou třecího momentu. Jako nejlepší varianta se ukázala kuličková ložiska z obou stran zakrytovaná bez těsnění s označením 6005-2Z (třecí moment přibližně 17 Nmm). Použitá ložiska byla navíc předepnuta pro vymezení vnitřních vůlí.

Snímač krouticího momentu byl k základní desce připevněn pomocí plechového držáku, ve kterém byly vytvořeny drážky umožňující posunutí tak, aby došlo k přesnému ustavení snímače a nedocházelo k přílišnému ovlivňování měření.

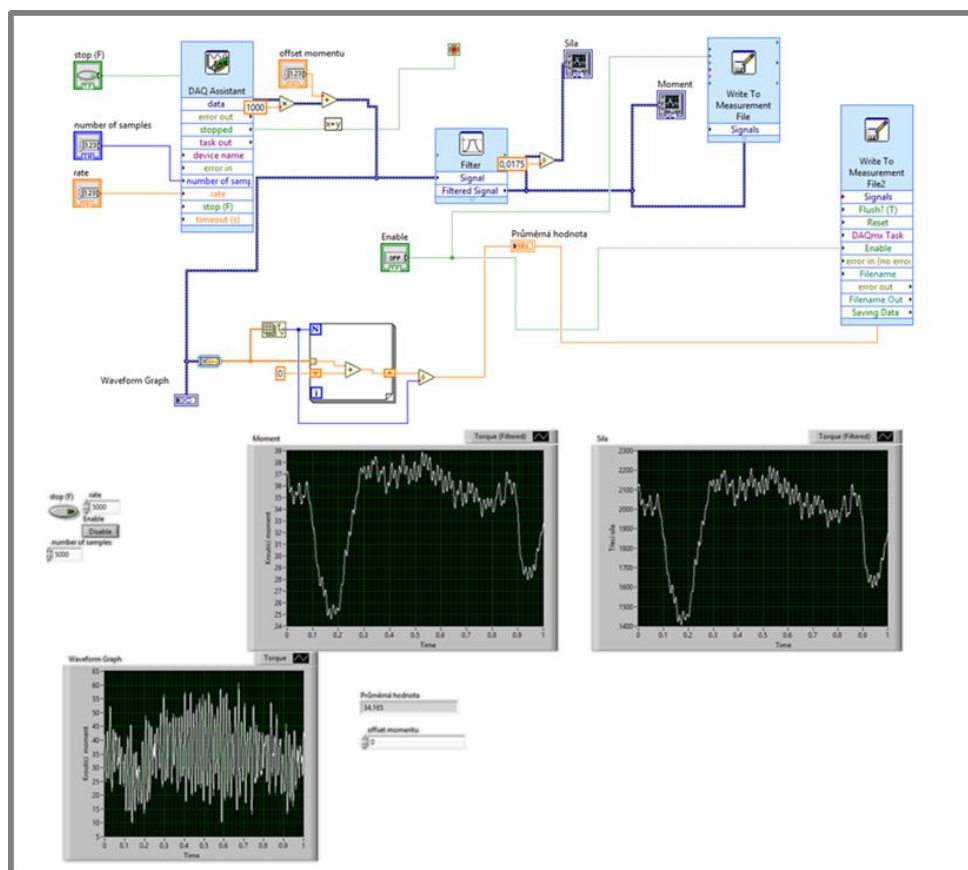


Obr. 4-5 Návrh úpravy měřicího modulu



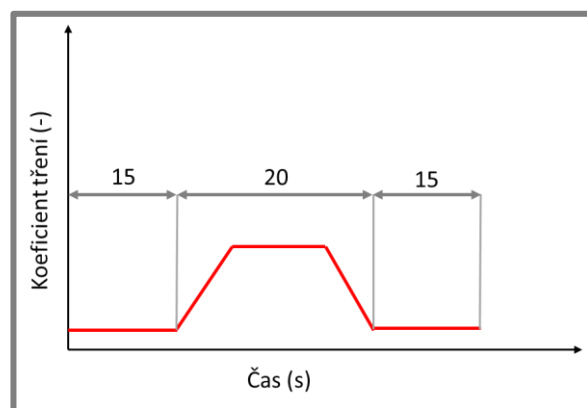
Obr. 4-6 Upravená část modulu block-on-ring

Pro záznam naměřených hodnot krouticího momentu byl vytvořen program (Obr. 4-7) v softwaru Labview. Snímán byl tedy krouticí moment, který se dále přepočítával na třecí sílu a ta se poté převedla na hodnoty součinitele tření. Z důvodu příliš velkého množství dat byla v programu vytvořena smyčka, která průměruje naměřené hodnoty z posledních dvou sekund měření a tato zprůměrovaná hodnota je poté uložena. Během měření bylo vždy nejdříve nutné zjistit hodnoty tření při chodu naprázdno (bez tlaku safíru na měřený vzorek), aby se z měření vyliminovalo tření podpůrných ložisek. Z daného důvodu bylo do programu přidáno pole pro odečítání hodnot tření naprázdno. Před každým měřením je tedy nejdříve nutné spustit měření naprázdno, poté z měření odečíst aktuální hodnotu tak, aby se v poli aktuální průměrované hodnoty objevila nula.



Obr. 4-7 Program pro záznam naměřených hodnot krouťícího momentu

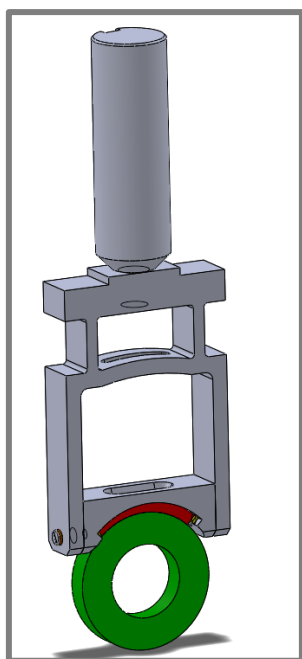
Proces měření byl rozdělen na několik úseků. Pro každou rychlost otáčení se nejdříve zjistila hodnota tření v podpůrných ložiscích, jejímž odečtením se snímač vynuloval. I přes dané nulování se hodnoty naprázdno během otáčení měnily v desetinách Nmm. Z daného důvodu byl samotný záznam měření rozdělen na tři úseky (Obr. 4-8). V prvním 15 sekundovém úseku se zaznamenávaly hodnoty tření před zatížením. Následovalo zatížení vzorku požadovanou silou, které trvalo 20 sekund. Poté se vzorek odtížil a zaznamenávaly se hodnoty tření po zatížení (opět 15 sekund). Zaznamenaná data před a po zatížení se zprůměrovala a odečetla od hodnot uložených během zatížení vzorku. Získaný výsledek pro dané zatížení a rychlost se následně uložil do souboru Excel. Daným postupem se pokračovalo pro další rychlosti a zatížení.



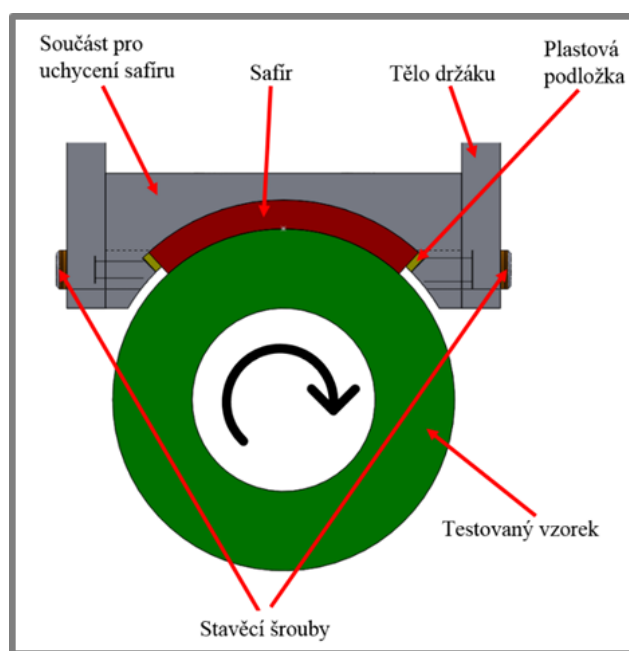
Obr. 4-8 Proces měření tření

4.2.3 Držák pro uchycení safíru

Původně využívaný držák u použitého tribometru nebyl vhodný pro uchycení zvolené safírové úseče a musel být tedy proveden návrh nového držáku (Obr. 4-9). Ten se skládá z hlavního těla a naklápěcí části (Obr. 4-10), která má stejný poloměr jako použitý safír, což umožňuje dosáhnout přesného uložení. Poloha safíru je zajištěna pomocí stavěcích šroubů, které jsou na jednom konci vhodně zkoseny tak, aby při zašroubování tlačily safír přes plastové podložky vůči rádiusu držáku. Daná část je poté k hlavnímu tělu připojena pomocí válcové části stavěcích šroubů, které zároveň umožňují naklopení a tím i přesné ustavení safíru na měřených vzorcích. Obě dané části byly zhotoveny z hliníku EN AW5083. Na výrobu stopky, za kterou se celý držák uchycuje do zařízení, byla použita nerez (X12Cr13).



Obr. 4-9 Navržený držák

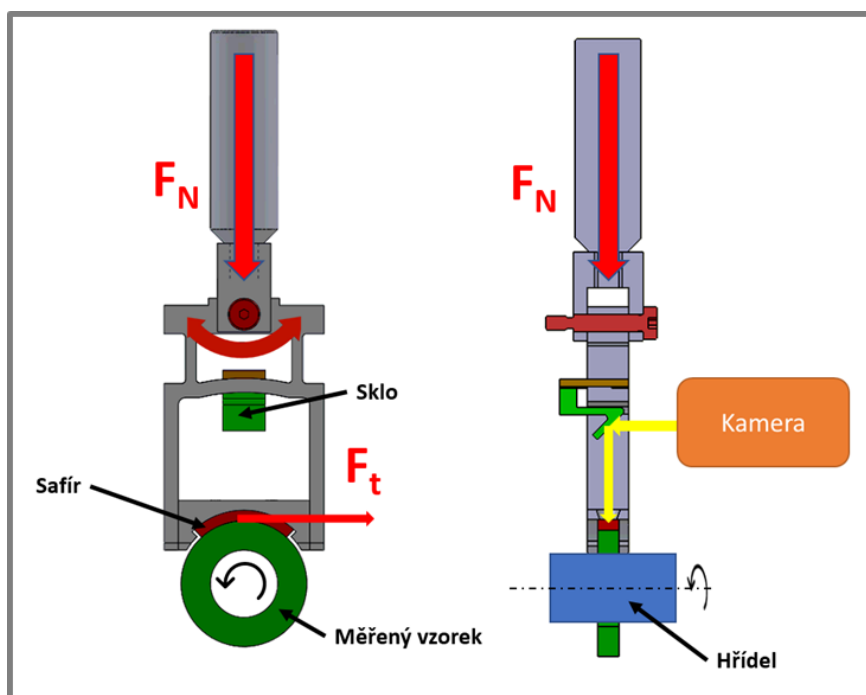


Obr. 4-10 Spodní část držáku doléhající na použitý vzorek

Tělo držáku bylo navrženo poddajné tak, aby se při zatížení 250 N mohl safír ve směru kolmém na osu vzorku volně pohybovat přibližně o 50 μm . Daná vůle měla umožňovat samovolné ustavení a zajištění sousosty safíru a měřených vzorků. Během experimentů bylo však využíváno menšího zatížení a navržené vůle nebylo dosahováno. Z tohoto důvodu byla vyrobena nová součást (Obr. 4-11) umožňující natáčení celého držáku přes lícovaný šroub, čímž je safíru umožněn pohyb v příčném směru a zároveň i natočení prostřednictvím naklápěcí části.

Do horní části těla držáku bylo v dalším kroku upevněno sklíčko (Obr. 4-11) sklopené o úhel 45°. Prostřednictvím odrazu od sklopeného sklíčka a průchodem skrz safír je možné využitím vysokorychlostní kamery zkoumat děj probíhající přímo uvnitř kontaktu. Držák se sklíčkem je možné po rádiu natáčet tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího vzhledu do kontaktu. Veškeré součásti byly zhotoveny prostřednictvím 3D tisku. Během návrhu držáku sklíčka se musel brát ohled na pracovní vzdálenost objektivů, které byly využity k optickému pozorování. Z daného důvodu muselo být sklíčko uchyceno tak, aby vzdálenost mezi kontaktem, sklíčkem a objektivem

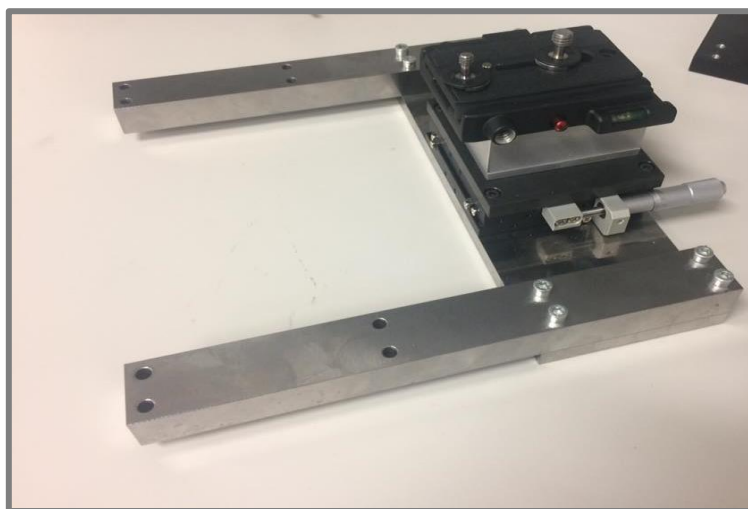
(znázorněno žlutými šipkami na Obr. 4-11) nepřesahovala pracovní vzdálenost použitého objektivu.



Obr. 4-11 Schéma principu zatěžování vzorku a optického pozorování

4.3 Optické měření

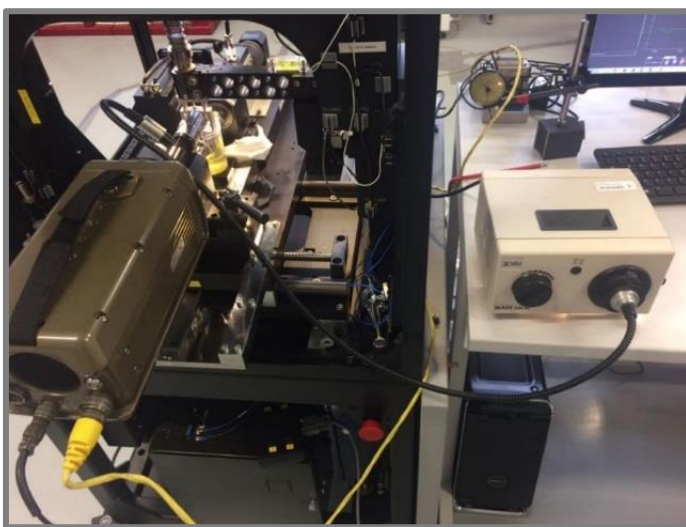
K realizaci optických měření byl využit výše popsáný držák, kde je prostřednictvím sklopeného sklíčka a safíru umožněn náhled do kontaktu. Pro pozorování kontaktu byly použity dvě optické metody, a to metoda optické interferometrie a fluorescence. Sestavy obou měřících metod byly k měřicímu modulu upevněny pomocí posuvného stolku (Obr. 4-12) s mikrometrickým šroubem pro zaostření snímaného obrazu. Z důvodu rozdílné velikosti soustav a způsobu uchycení musel být držák pro každou metodu speciálně upraven.



Obr. 4-12 Posuvný stůlek s mikrometrickým šroubem pro upevnění měřících soustav

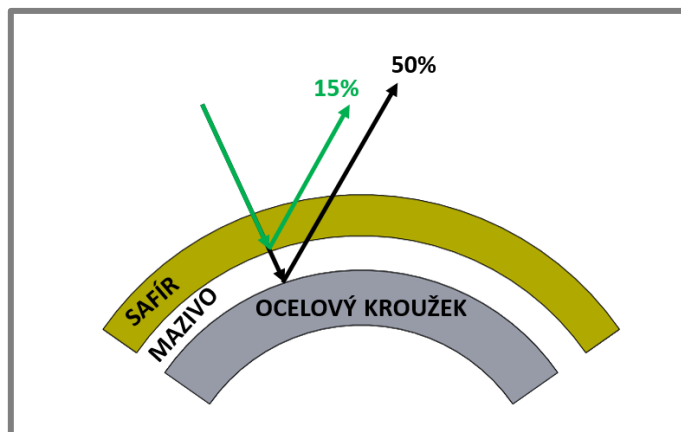
4.3.1 Optická interferometrie

U metody optické interferometrie byl kontakt pozorován prostřednictvím vysokorychlostní kamery s označením Phantom v710 (Obr. 4-13), pomocí které je možné zkoumat přímo tribologické děje probíhající uvnitř kontaktu. Kamera s rozlišením až 1280 x 720 (720p) je využívána pro záznam velmi rychlých tribologických procesů a změn tloušťek mazacího filmu. Je schopna zachytit až 8360 (při rozlišení 720p) snímků za sekundu. Kamera byla osazena objektivem 5x Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Long WD s pětinasobným zvětšením a pracovní vzdáleností 34 mm. Jako zdroj bílého světla byla použita halogenová lampa MARS 150 AC s výkonem až 150 W.



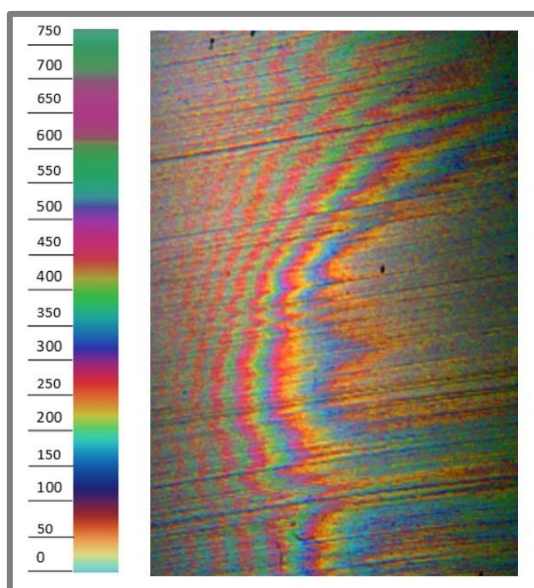
Obr. 4-13 Experimentální zařízení pro měření s využitím optické interferometrie

Paprsek světla během pozorování prochází přes safír (index lomu 1,77) a odrazí se až od pozorovaného vzorku (Obr. 4-14). Část paprsku se však odrazí od rozhraní safír-mazivo. Tyto odražené paprsky spolu interferují a vytváří interferogramy. Intenzita odražených paprsků je závislá na velikosti rozdílu indexů lomu jednotlivých prostředí. Z důvodu navýšení tohoto rozdílu se u většiny experimentů testované vzorky pokrývají chromovou vrstvou. V dané práci však nebyla tato vrstva na povrchy vzorků aplikována a výsledné interferogramy nedosahovaly tak vysoké intenzity. Pro navýšení intenzity se tak namísto minerálního oleje (index lomu 1,5) použilo fluorované mazivo (index lomu 1,3), čímž bylo dosaženo výraznějšího rozdílu indexů na rozhraní mazivo-safír.



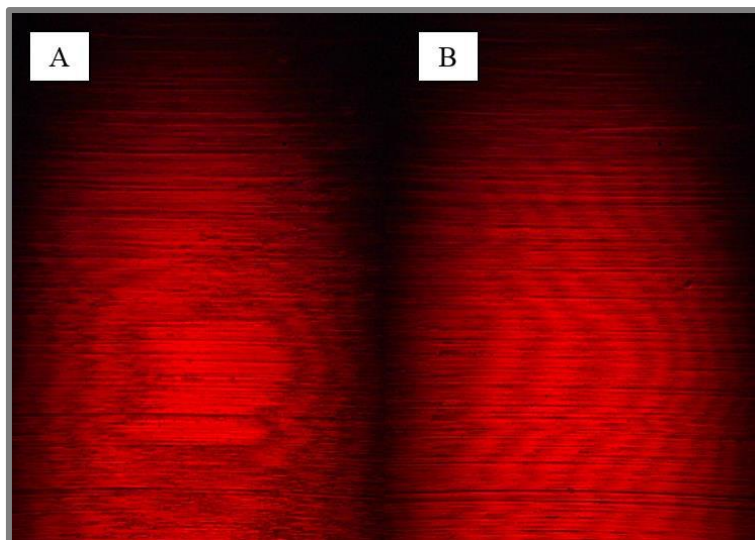
Obr. 4-14 Princip optické interferometrie a hodnoty interference pro jednotlivá rozhraní s fluorovaným mazivem

Pro vyhodnocování získaných interferogramů nebyl použit žádný software, ale docházelo pouze k optickému porovnání zachycených barev s barevným spektrem (Obr. 4-15). Použité spektrum však bylo kalibrováno pro bodový kontakt, u kterého je jiný fázový posuv než u kontaktu v dané práci. Z daného důvodu muselo být použité spektrum upraveno a jako minimální tloušťka maziva byla uvažována šedivá barva.



Obr. 4-15 Interferogram statického kontaktu hladkého vzorku

Kromě bílého světla bylo vyzkoušeno i měření s využitím monochromatického světla (světlo s jednou vlnovou délkou). Na následujícím obrázku (Obr. 4-16) je s využitím daného světla zobrazen kontakt mezi safírem a hladkým vzorkem. Jedinou možností, jak vyhodnocovat tloušťku maziva, bylo sčítání jednotlivých interferenčních proužků, které charakterizovaly určitou hodnotu tloušťky maziva. Jelikož obraz snímáný pomocí kamery pokrýval pouze část kontaktní oblasti, nebylo možné při vyšších rychlostech pozorovat posun konkrétních proužků. U texturovaných vzorků byly navíc interferenční proužky mezi vtisky velmi špatně viditelné a prakticky nevyhodnotitelné.



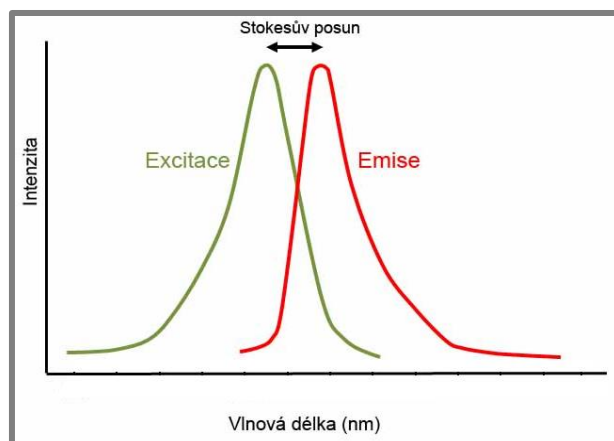
Obr. 4-16 A- statický kontakt netexturovaného vzorku a saříru, B-navyšování tloušťky mazacího filmu v daném kontaktu

4.3.2 Fluorescence

4.3.2

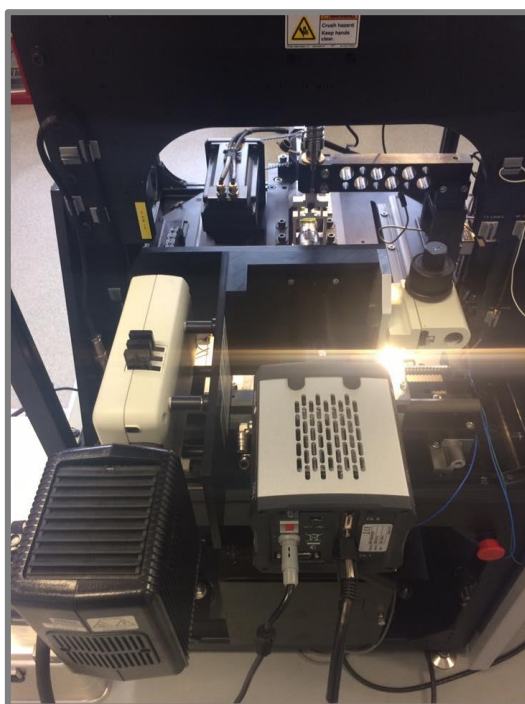
Pro měření tloušťky mazacího filmu a pozorování kavitačních dějů byla rovněž využita měřicí metoda založená na principu indukované fluorescence [20]. Fluorescence je světelná emise látky, která je vystavena světelnému záření nebo jinému elektromagnetickému záření. Jde o druh fotoluminiscence, která se rozděluje na fosforescenci a fluorescenci. Obě metody se liší především dobou emise látky, která u fosforescence po odstranění světelného zdroje probíhá mnohem delší dobu než u fluorescence.

Proces fluorescence probíhá ve třech bodech. Nejprve dochází k excitaci, kde foton o excitační vlnové délce, který je vyzařován žhavicí lampou nebo laserem, je absorbován fluoroforem obsaženým ve fluorescenčním barvivu. Následuje excitovaný stav, během kterého dochází k částečné disipaci energie a rovněž může docházet i k emisi záření. Závěrečným bodem je pak emise. V průběhu excitovaného stavu má foton vyzařovaný barvivem nižší energii kvůli disipaci energie. Z daného důvodu vyzařuje emisní záření o vyšší vlnové délce. Rozdíl mezi emisní a excitační vlnovou délkou se nazývá tzv. Stokesův posun (Obr. 4-17).



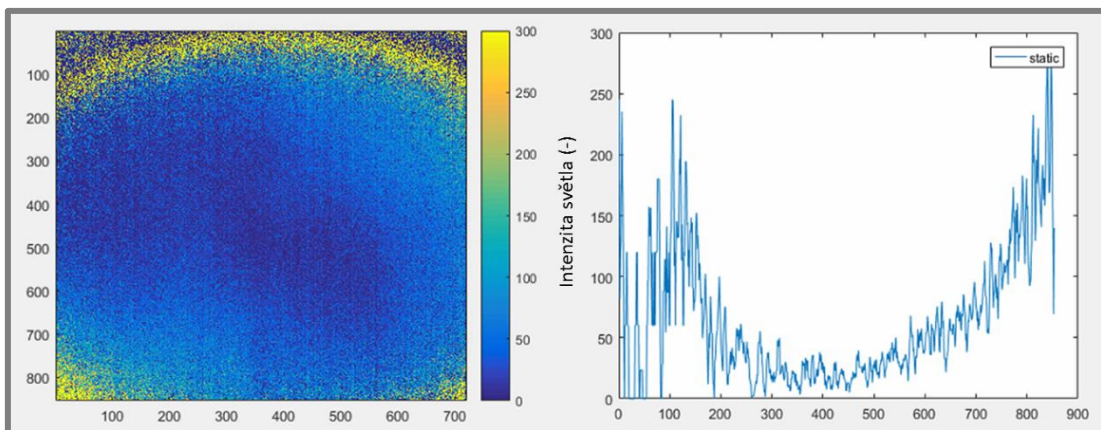
Obr. 4-17 Stokesův posun

Emise vyzařovaná použitým mazivem byla zachycována snímačem kamery. Jednalo se o kameru (Obr. 4-18) Neo 5.5 (Andor Technology Ltd) vybavenou chlazeným, 16 bit sCMOS snímačem, který umožňuje snímat chování kontaktu v rozlišení 2560×2160 pixelů při 36 fps. Jako zdroj světla byla využita rtuťová lampa vyzařující bílé světlo. V programu, který je dodáván spolu s kamerou, je možné libovolně měnit expoziční dobu, kterou bylo během měření cílem co nejvíce snížit z důvodu kvalitního záznamu probíhajících procesů. Kamera však neumožňovala tzv. „global shutter“, ale pouze „rolling shutter“, což znamená, že nesnímá celou oblast obrazu současně, ale postupně ji skenuje z jedné strany snímače na druhou po řádku a dochází tak ke zkreslení zaznamenávaného pohybu.



Obr. 4-18 Experimentální zařízení pro měření s využitím fluorescenční metody

Měřením pomocí fluorescenční metody je hodnota tloušťky maziva vyhodnocována na základě intenzity světla. K vyhodnocování intenzity byl využit program vytvořený v softwaru Matlab, pomocí kterého je možné na jednotlivých snímcích určit řez a nebo vybrat oblast, kde má být intenzita vyhodnocena, aby bylo možné stanovit její hodnotu přímo v konkrétní oblasti mezi vtisky. Tloušťky se vyhodnocovaly pouze na základě bezrozměrné hodnoty intenzity světla, jelikož není možné jednoduše zkalibrovat údaje o intenzitě s hodnotami tloušťky v nanometrech. Na následujícím obrázku (Obr. 4-19) je vlevo zobrazen statický kontakt hladkého vzorku zaznamenaný pomocí fluorescenční aparatury. Vpravo je pak zobrazen graf intenzity světla v místě zvoleného řezu.



Obr. 4-19 Vyhodnocení tloušťky maziva na základě intenzity světla

4.4 Kontaktní tělesa

4.4

Tato kapitola je věnována podrobnějšímu popisu jednotlivých kontaktních těles využitých k realizaci experimentů.

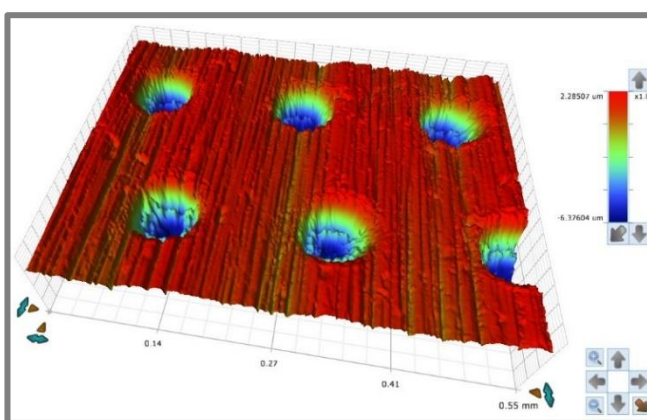
4.4.1 Experimentální vzorky

4.4.1

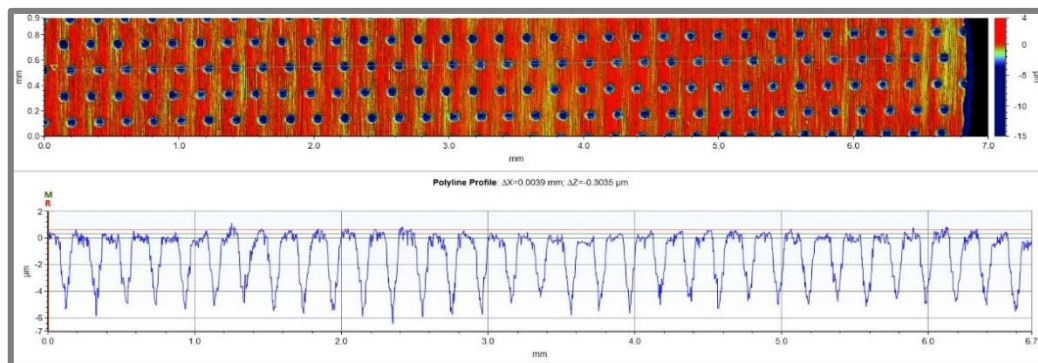
Jako vzorky byly použity vnější kroužky ložisek (Obr. 4-21) od firmy TIMKEN o vnějším průměru 35 mm a šířce 8 mm. Kroužky byly vyrobeny z materiálu 14 109 o tvrdosti 60 HRC a modulu pružnosti $E = 210$ GPa. Tři vzorky byly opatřeny kruhovými vtisky (Obr. 4-20) o průměru 56 μm . K detailnějšímu pozorování jednotlivých textur byl využit 3D optický profilometr Contour GT-X od firmy Bruker. Vtisky byly uspořádány do sloupců a řad (Obr. 4-22). Jednotlivé sloupce měly mezi sebou vzdálenost přibližně 204 μm a řady se od sebe nacházely ve vzdálenosti 207 μm . Hloubky kruhových vtisků se pohybovaly v rozmezí (4 až 6) μm . Z Obr. 4-22 je rovněž možné vidět, že vtisky byly v jednotlivých sloupcích vůči sobě střídavě posunuty.



Obr. 4-21 Vnější kroužky ložisek od firmy TIMKEN (použité vzorky)



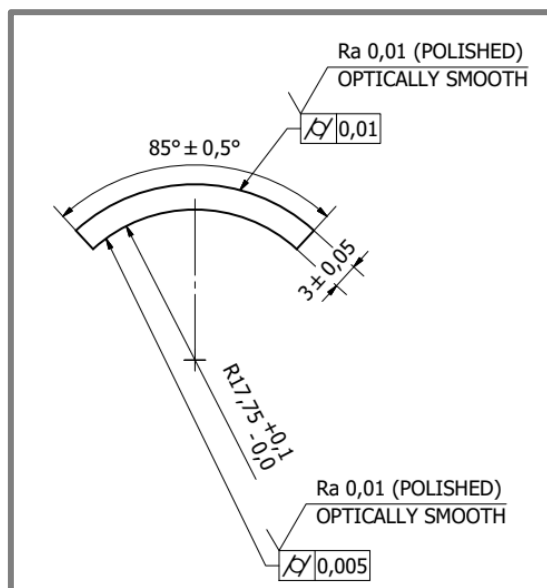
Obr. 4-20 Vytvořené vtisky na vzorcích



Obr. 4-22 Rozmístění vtisků na povrchu vzorků

4.4.2 Safírová úseč

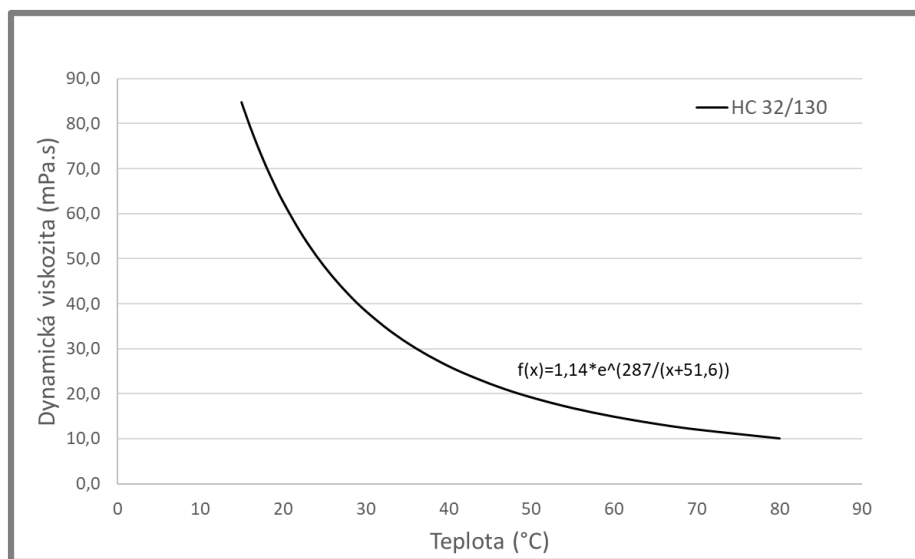
Na testované vzorky doléhala safírová úseč (Obr. 4-23) o průměru přibližně 35,5 mm a šířce 6 mm. Podrobněji byl safír opět zkoumán prostřednictvím 3D optického profilometru, pomocí kterého byla zjištěna drsnost přibližně 10 nm a rovinnost na hranách (80 nm) a uprostřed povrchu (43 nm).



Obr. 4-23 Rozměry safírové úseče

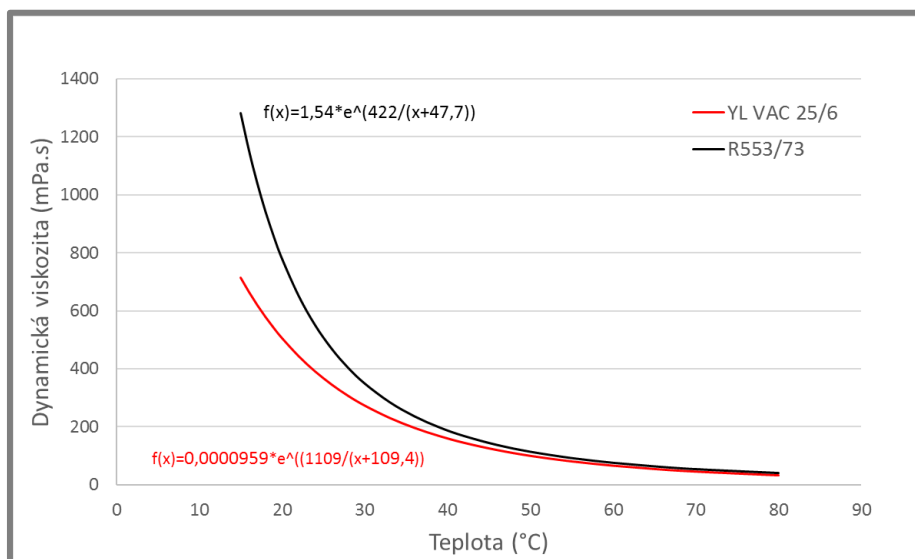
4.5 Mazivo

Jelikož cílem práce bylo proměřit řadu provozních podmínek, došlo k aplikování několika druhů olejů s odlišnou viskozitou. K měření byl nejprve použit minerální olej s označením HC 32/130 (označován jako HC) a indexem lomu přibližně 1,5. Závislost jeho dynamické viskozity na teplotě je možné vidět na následujícím grafu (Obr. 4-24). Minerální olej je zejména výhodný pro měření využitím metody fluorescence, jelikož má schopnost přirozené fluorescence.



Obr. 4-24 Závislost dynamické viskozity oleje HC 32/130 na teplotě

S cílem zkoumat vliv vtisků i za použití oleje s vysokou viskozitou (Obr. 4-25) byl následně použit minerální olej s označením R553/73 (označován jako R) a fluorované mazivo Fomblin PFPE YL VAC 25/6 (označováno jako F) s indexem lomu přibližně 1,7.



Obr. 4-25 Závislost dynamické viskozity maziv R a F na teplotě

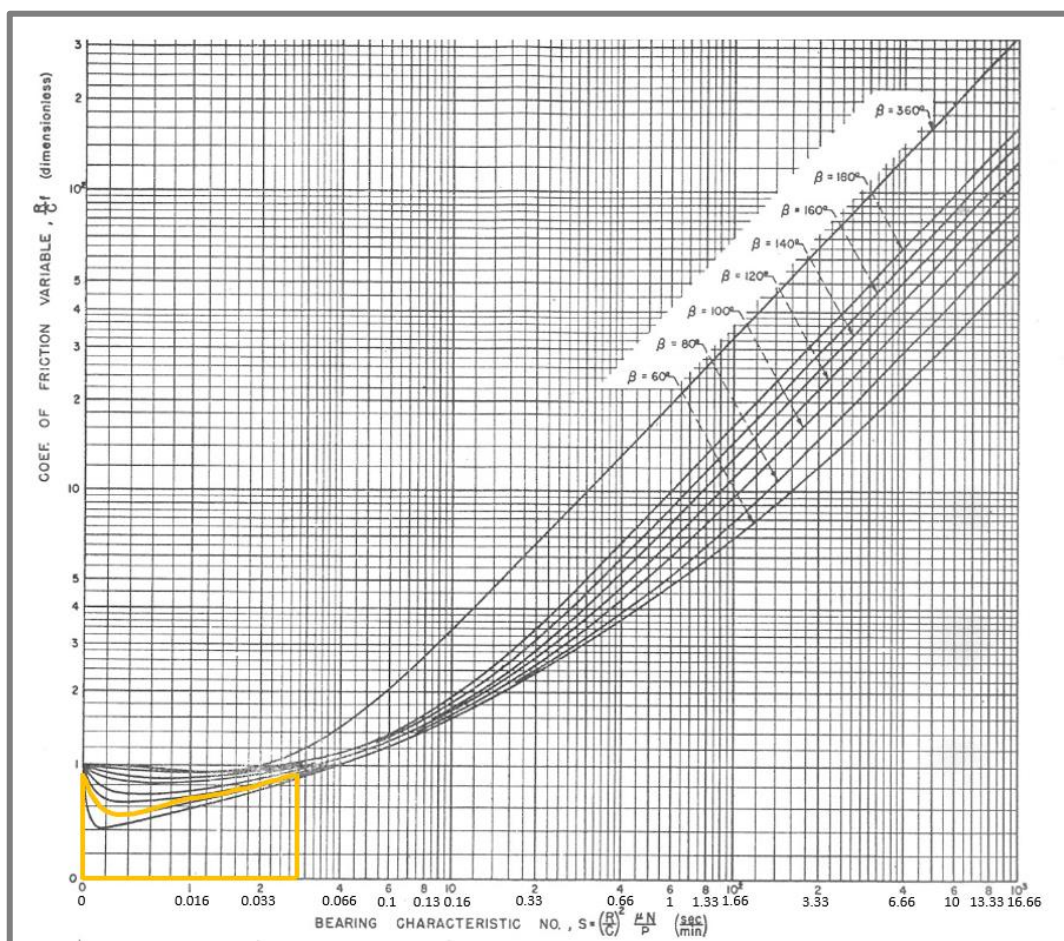
4.6 Typy experimentů

4.6

V experimentech byly porovnávány dva druhy vzorků. První z nich byly vzorky opatřeny vtisky kruhového tvaru o výše popsaných parametrech. U těchto vzorků byl zjišťován vliv vtisků na součinitel tření a tloušťku mazacího filmu při různých provozních podmínkách. Jako druhý typ byly použity vzorky s hladkým povrchem, u kterých se provedly testy při stejných podmínkách a sloužily tak k porovnání výsledných hodnot, aby bylo možné stanovit vliv vytvořených textur.

Cílem první série testů bylo zjistit vliv vytvořených vtisků na součinitel tření.

Experimenty probíhaly při zatížení v rozmezí (20-80) N (0,14-0,55 MPa) a skokovitě narůstající rychlosti otáčení v rozsahu (10-400) $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ (0,018-0,732 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Aplikovány byly rovněž odlišné druhy maziv, a to s nízkou dynamickou viskozitou (53,4 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ a 78 $\text{mPa} \cdot \text{s}$) a naopak s vysokou dynamickou viskozitou (416 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ a 470 $\text{mPa} \cdot \text{s}$). Podle vztahů ve studii [4] se pro stanovené provozní podmínky a daný typ parciálního ložiska určila hodnota Sommerfeldova čísla. Na následujícím grafu (Obr. 4-26) je žlutě znázorněna oblast, která byla aplikováním zvolených provozních podmínek v této práci proměřena. Na ose x jsou v horní řadě uvedeny hodnoty Sommerfeldova čísla v jednotkách (sec/min) a ve spodní řadě pak v bezrozměrné podobě. Zobrazený graf však slouží pro ložiska s poměrem $l/d=1$. Z daného důvodu se pro teoretické stanovení hodnot součinitele tření využil přepočít pro použitý typ parciálního ložiska ($l/d=0,25$ a $\beta=85^\circ$), který je uveden ve studii [21]. Vypočítané hodnoty součinitele tření pro určité provozní podmínky jsou zaznamenány v následující tabulce (Tab. 4-1). Stanovené hodnoty sloužily během úvodních měření k ověření, zda je nastavenou konfigurací dosahováno reálných výsledků.



Obr. 4-26 Závislost poměru $(R/C)f$ na Sommerfeldově čísle pro daný typ kluzného ložiska [4]

Tab. 4-1 Teoreticky stanovené hodnoty součinitele tření

Zatížení	Viskozita	Otáčky	Sommerfeldovo číslo	Součinitel tření
20 N	53,4 mPa·s	100 ot·min ⁻¹	$1,47 \cdot 10^{-3}$	0,004
20 N	53,4 mPa·s	300 ot·min ⁻¹	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,008

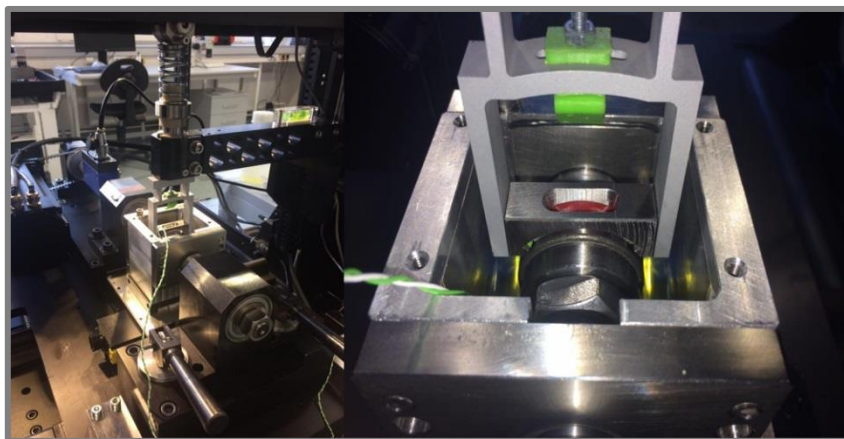
Pro určité provozní podmínky, u kterých byl v předešlých experimentech zjištěn významný vliv vtisků na výsledné hodnoty součinitele tření, se v další části práce přešlo k testování s využitím optického pozorování. Cílem daných experimentů bylo zjištění dějů, ke kterým dochází v kontaktu při daným provozních podmínkách. Pozorován byl tedy vznik místní kavitace a tloušťka mazacího filmu využitím optické interferometrie a fluorescence. Současně docházelo i ke kontrolování hodnot tření tak, aby došlo skutečně k propojení měření tření a optického pozorování.

5 VÝSLEDKY

5.1 Úvodní měření a ověření funkčnosti zařízení

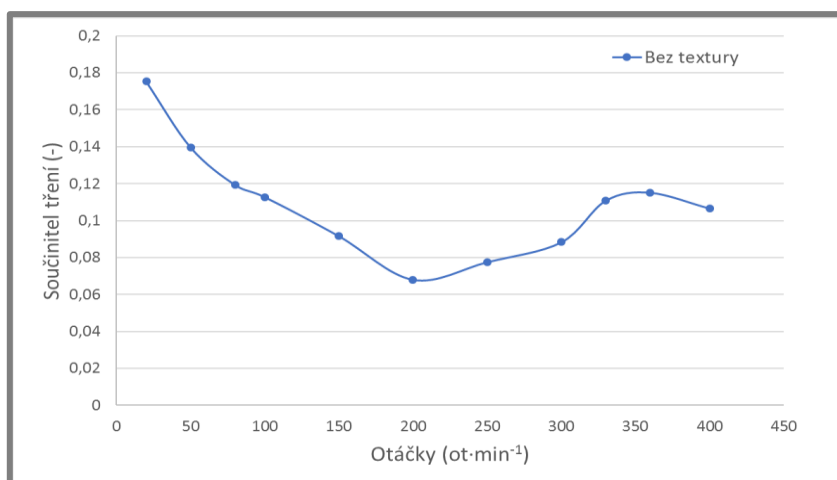
5.1.1 Testy pro ověření funkčnosti upraveného zařízení

Na upraveném zařízení byly nejprve provedeny testy pro ověření správné funkčnosti (Obr. 5-1). Zpočátku byly aplikovány nízké hodnoty zatížení v rozmezí (20-30) N, aby nedošlo k případnému poškození safíru vlivem velkého radiálního zatížení. Otáčky se skokovitě navyšovaly z hodnoty $10 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ až na hodnotu $400 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Cílem bylo proměřit oblast provozních podmínek, pro které byla teoreticky stanovena hodnota součinitele tření. Během daných testů se měřené vzorky brodily v minerálním oleji HC, který má při teplotě měření ($23 \text{ }^{\circ}\text{C}$) viskozitu přibližně $53,4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.



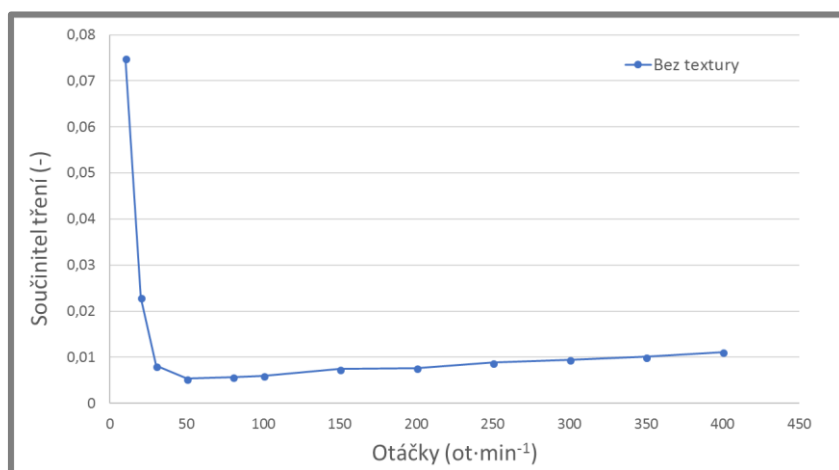
Obr. 5-1 Měření na upraveném zařízení

Výsledky úvodních měření však neodpovídaly teoretickým předpokladům. Při zatížení 20 N a rychlosti $100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ vycházela výpočtem hodnota součinitele tření přibližně 0,004. Tento výsledek se však během měření nepotvrdil a hodnoty v dané oblasti provozních podmínek vycházely řádově vyšší.



Obr. 5-2 První měření pro ověření funkčnosti zařízení - nepříznivé výsledky (zatížení 20 N a viskozita $53,4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)

Příčinou nepříznivých výsledků se ukázalo být nepřesné ustavení držáku safíru. Vlivem nepřesného ustavení nebyla zajištěna sousost safíru a měřeného vzorku. Z tohoto důvodu byla provedena úprava držáku (viz kapitola 4.2.3), která safíru umožnila samovolné ustavení, čímž bylo dosaženo stejných podmínek pro oba typy vzorků. Pro kontrolu přesného ustavení bylo využito optického pozorování, prostřednictvím kterého se sledoval tvar utvářeného kontaktu. Po přesném ustavení se opět provedla série experimentů, při kterých se hodnoty součinitele tření ve sledované oblasti více přiblížily teoretickým předpokladům a lišily se pouze o 13 %.



Obr. 5-3 Měření s upraveným uchycením držáku safíru (zatížení 20 N a viskozita 53,4 mPa·s)

Dalším problémem, který byl zjištěn v průběhu testovacích měření, byla vysoká hodnota tření při chodu naprázdno (bez zatíženého hlavního kontaktu v safírovém kluzném ložisku). Hlavním důvodem se ukázalo být použité těsnění v nádobě na mazivo, která byla nasouvána na poháněnou hřídel. S danou nádobou se hodnoty tření při chodu naprázdno navyšovaly až na hodnotu 200 Nmm, což představuje 20 % měřicí kapacity použitého snímače. Po odstranění těsnění kleslo tření až na hodnotu 20 Nmm, což je tření způsobeno použitými ložisky. Z daných důvodů musela být provedena výroba nové hliníkové nádoby. Nově vyrobená nádoba už neobsahovala těsnění a na hřídeli byla nasunuta s vůlemi. Množství maziva bylo v nádobě voleno tak, aby se testované vzorky v mazivu brodily, ale zároveň aby nedocházelo k jeho úniku netěsnostmi během provozu.

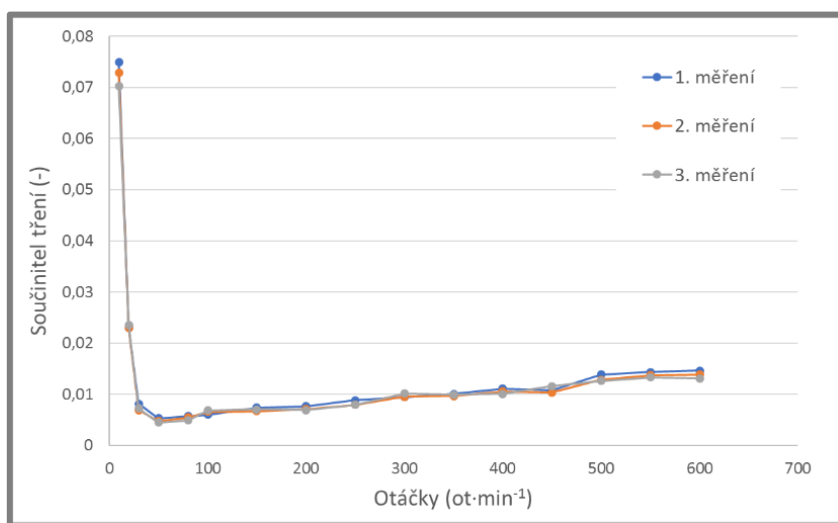
5.1.2 Testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

5.1.2

Aby bylo možné přesně porovnávat výsledky měření pro dva typy použitých vzorků, musely být provedeny testy reprodukovatelnosti a opakovatelnosti, které ověří, zda jsou podmínky měření pro oba případy ustálené. Jelikož byly v dané práci měřeny hodnoty tření v konformním kontaktu, u kterého je dosahováno nízkých hodnot součinitele tření, jsou tyto testy velice důležité. Během prvních měření bylo zjištěno, že jeden z ložiskových domků, který se nasouval na volný konec hřídele a zajišťoval tužší uložení, ovlivňoval měřené hodnoty tření. Z daného důvodu byl vzhledem k nízkým zatížením tento domek odstraněn a hřídel byla uložena pouze letmo.

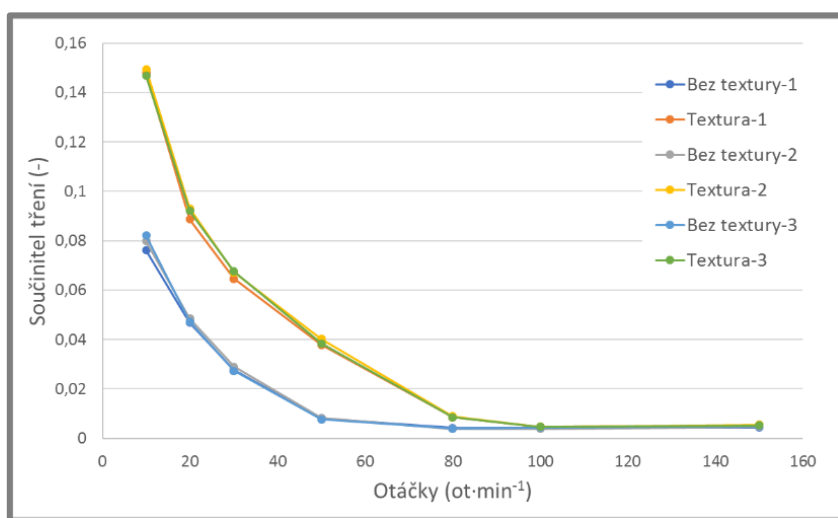
Při měření reprodukovatelnosti (Obr. 5-4) se zařízení mezi jednotlivými měřeními zcela rozebralo, což bylo důležité zejména z důvodu využití experimentálního zařízení i pro jiné způsoby testování, při kterých je nutné jednotlivé

části vyměnit. Hodnoty se v průběhu testování lišily průměrně o 7 %. Celková směrodatná odchylka byla 0,009.



Obr. 5-4 Opakovatelnost měření při úplném rozebrání zařízení (zatížení 20 N a viskozita 53,4 mPa·s)

U druhého způsobu testování opakovatelnosti (Obr. 5-5) se provedlo opakované měření stejných provozních podmínek, při kterém se střídavě měnily testované vzorky. Výsledné hodnoty součinitele tření se u obou typů vzorků lišily průměrně o 4 %. U hladkých vzorků dosahovala celková směrodatná odchylka hodnoty 0,006 a u texturovaných vzorků 0,007.

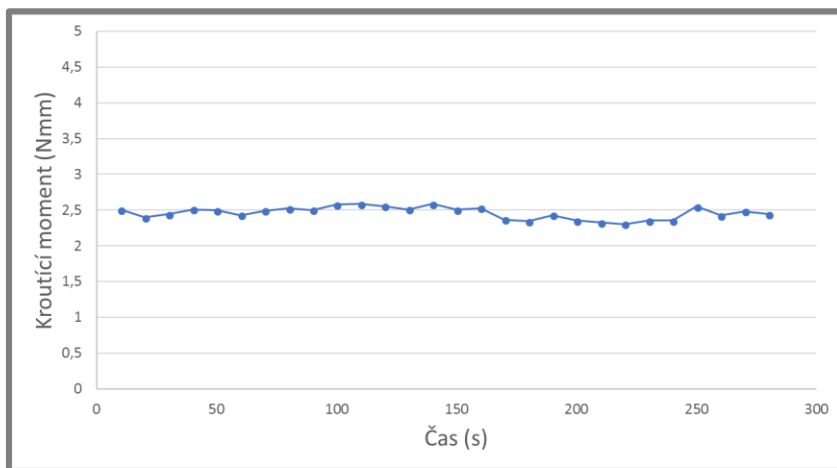


Obr. 5-5 Opakovatelnost měření bez rozebrání zařízení (zatížení 60 N a viskozita 53,4 mPa·s)

5.1.3 Vliv zvýšené teploty v okolí místa kontaktu

Cílem těchto měření bylo ověřit, zda při delším testování nedochází k výraznější změně teploty a lze tedy testované podmínky z hlediska teploty považovat za ustálené. V opačném případě by se musel zvolit vhodný postup testování, který by zaručil ekvivalentní podmínky. K měření byl využit vzorek s vtisky, na který působil safír

zatížením 20 N při rychlosti 100 ot·min⁻¹ (Obr. 5-6) po dobu 4,5 minuty. Teplota byla střídavě měřena na čelní ploše safíru a na vstupu do kontaktu. Teplota během experimentu stoupla maximálně o 0,4 °C, což nemělo vliv na výsledné hodnoty a měření tak bylo po celou dobu ustálené. Hodnoty krouticího momentu se během celého testu pohybovaly kolem velikosti 2,5 Nmm a nedošlo k žádné výraznější změně.



Obr. 5-6 Závislost krouticího momentu na čase (zatížení 20 N, otáčky 100 ot·min⁻¹, viskozita 53,4 mPa·s a délka testu 4,5 minuty)

5.2 Vliv texturovaného povrchu na hodnoty tření

5.2

Po ověření funkčnosti měřícího zařízení se přešlo k realizaci testů s texturovanými vzorky pro objasnění vlivu vytvořených vtisků na hodnoty součinitele tření (cof). Cílem provedených experimentů bylo změřit oblast provozních podmínek, které byly stanoveny v kapitole 4.6.

Do následujících grafů jsou zaneseny naměřené body a křivky, které jsou tvořeny proložením naměřených dat vhodnými funkcemi (hodnoty jednotlivých členů funkcí viz PŘÍLOHA 1). U oleje s nižší viskozitou (HC), kde docházelo k přechodu mezi mazacími režimy, se celkový součinitel tření skládal ze tří částí (5). Funkce (6), která sloužila k proložení dat, měla dvě hlavní složky, kde první z nich sloužila k proložení dat v oblasti mezního režimu a druhá následně pro data v režimu hydrodynamickém. Přechod mezi jednotlivými režimy se stanovil na základě určení rychlosti, při které funkce popisující tření plynoucí od přímých kontaktů mezi povrchy ve smíšeném režimu nabývá 2 % hodnoty mezního tření. Parametr $f_{\text{par.2}}$ v rovnicích představuje parazitní hodnoty tření podpůrných ložisek, které jsou závislé na zatížení. U olejů s vyšší viskozitou (F a R) se už neobjevoval přechod mezi mazacími režimy a celý experiment probíhal v režimu hydrodynamickém. Získaná data byla proložena funkcí (7).

$$\text{cof} = \text{cof}_{\text{BL}} + \text{cof}_{\text{HD}} + f_{\text{par.2}} \quad (5)$$

$$\text{cof} = a \cdot e^{b \cdot v} + c \cdot v^d + f_{\text{par.2}} \quad (6)$$

kde:

cof_{BL} součinitel tření v mezním režimu cof_{HD} součinitel tření v hydro. režimu

a	součinitel mezného tření	$c \cdot v^d$	člen viskózního tření
b	parametr přechodu	c	parametr závislý na viskozitě
v	rychlost	d	koeficient mocninné závislosti
$f_{\text{par.2}}$	parazitní tření		

$$\text{cof} = c \cdot v^d + f_{\text{par.2}} \quad (7)$$

5.2.1 Vliv textur na součinitel tření

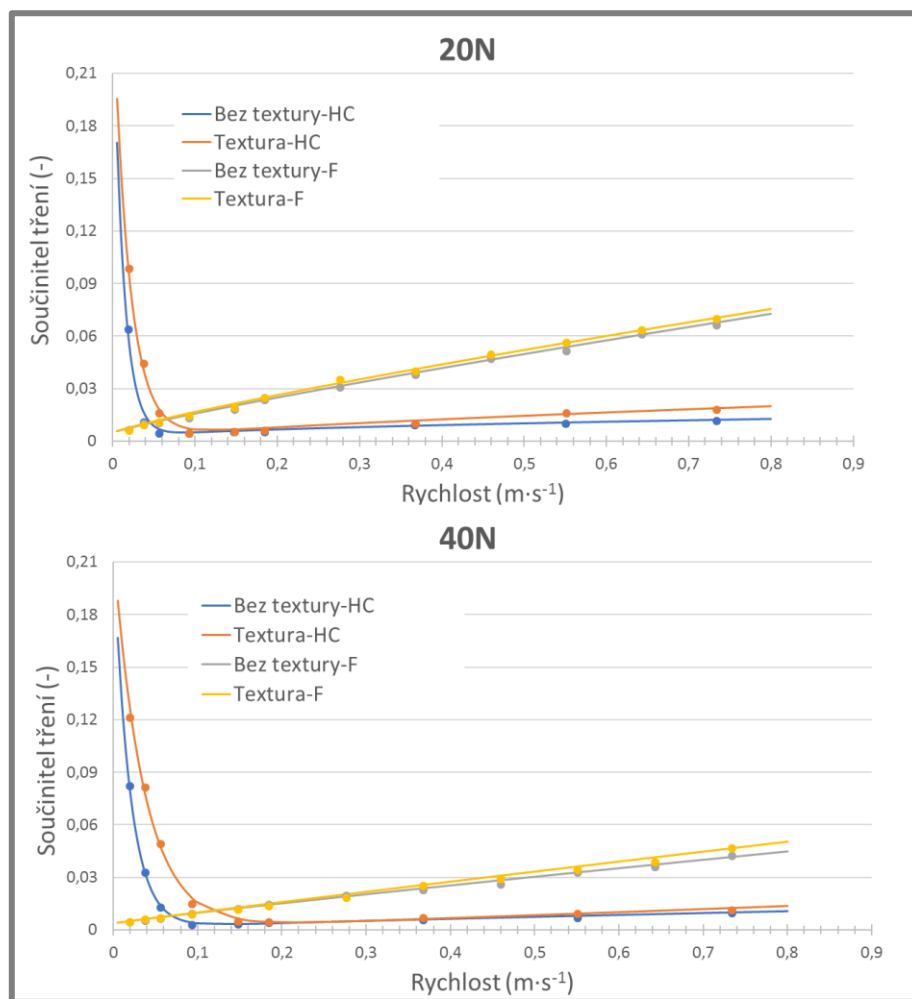
Na následujících grafech (Obr. 5-7 a Obr. 5-8) jsou znázorněny hodnoty součinitele tření v závislosti na obvodové rychlosti pro odlišné zatížení a viskozitu maziva. Vzorky byly postupně zatěžovány silami v rozmezí (20-70) N při skokově narůstající rychlosti v rozmezí (0,005-0,8) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Testy probíhaly za přítomnosti minerálního oleje HC (53,4 $\text{mPa} \cdot \text{s}$) a fluorovaného maziva F (416 $\text{mPa} \cdot \text{s}$).

U minerálního oleje HC se při aplikování zatížení 20 N (Obr. 5-7) objevil u hladkého vzorku přechod mezi mazacími režimy přibližně při rychlosti 0,05 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Použitím texturovaného vzorku se však tento přechod posunul až na rychlost 0,08 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, což představuje 56% změnu. Z daného výsledku plyne, že pro stejnou rychlost bude u texturovaného vzorku větší zatížení přenášeno přímým stykem povrchů, čemuž odpovídá i nárůst součinitele tření oproti hladkému vzorku. Ve smíšeném režimu tak vtisky způsobily výrazné navýšení hodnot tření, které celkově stoupl o 58 %. Krátce po přechodu do hydrodynamického režimu se hodnoty tření u obou vzorků téměř vyrovnaly, ale postupným navyšováním rychlosti se opět projevoval negativní vliv vtisků, což způsobilo celkové navýšení tření v hydrodynamickém režimu o 41 %.

Využitím fluorovaného maziva F byly při nejnižších rychlostech hodnoty součinitele tření u obou vzorků téměř totožné. Postupným navyšováním rychlostí se projevil negativní vliv texturovaného povrchu a hodnoty tření se mírně navyšovaly. Během daného experimentu způsobily vtisky celkové navýšení tření přibližně o 5 %.

Navýšením zatížení na hodnotu 40 N (Obr. 5-7) se přechod mezi mazacími režimy u hladkého vzorku oproti nižšímu zatížení posunul na vyšší rychlost (0,075 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Zvýšené zatížení se rovněž projevilo výraznějším vlivem (87 %) texturovaného povrchu na posun daného přechodu. Ve smíšeném režimu vtisky při tomto zatížení způsobily celkové navýšení tření o 78 %, což je o 20 % více než u nižšího zatížení. Naopak v hydrodynamickém režimu nárůstem zatížení vliv vtisků klesl a tření zde celkově stoupl o 19 %.

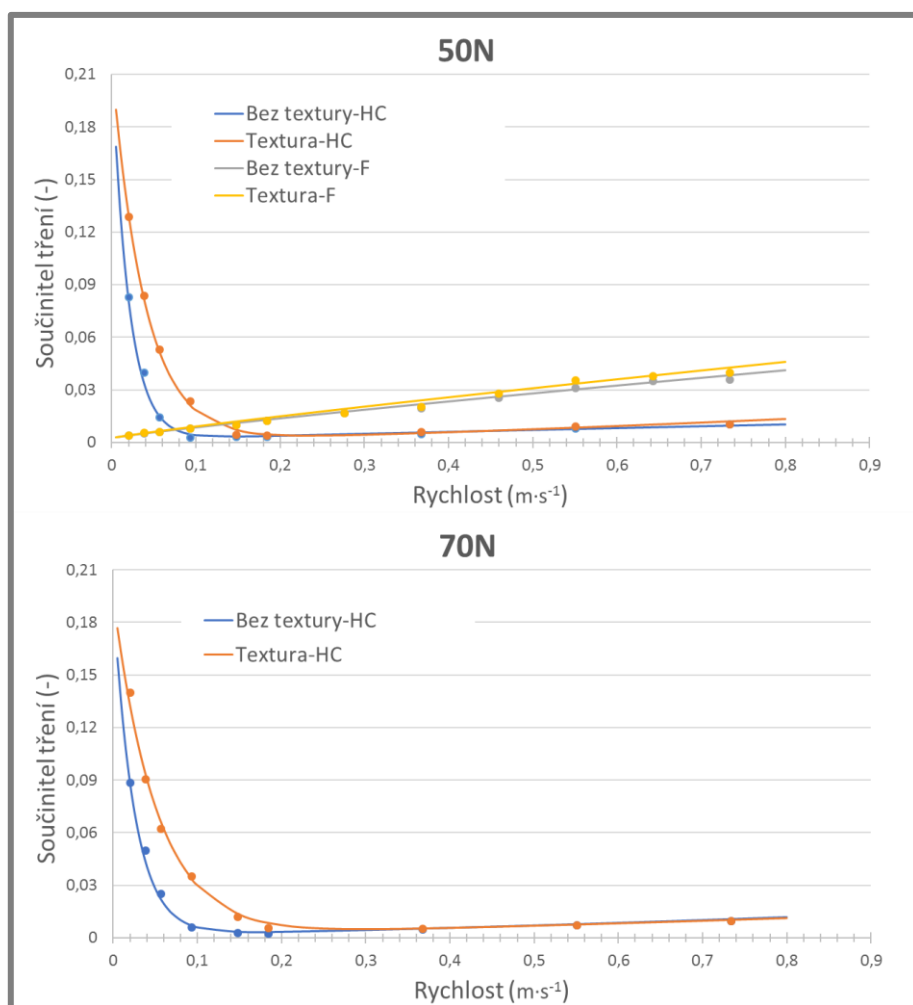
U fluorovaného maziva byl průběh podobný jako u nižšího zatížení. K mírnému nárůstu tření vlivem vtisků docházelo až u vyšších rychlostí otáčení a hodnoty zde celkově stouply o 6 %.



Obr. 5-7 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 20 a 40 N; viskozita: 53,4 a 416 mPa·s)

Dalším navyšováním zatížení na hodnoty 50 a 70 N (Obr. 5-8) měly výsledky obdobný trend jako v předchozích experimentech. Přechod mezi režimy mazání se u hladkého vzorku posouval na vyšší rychlosti otáčení a texturované vzorky měly stále vyšší vliv na jeho ještě výraznější posun. Aplikováním zatížení 50 N se v důsledku přítomnosti vtisků rychlost přechodu navýšila o 94 % a při zatížení 70 N až o téměř 107 %. Ve smíšeném režimu měly vtisky obdobný vliv na hodnoty tření jako u zatížení 40 N a docházelo zde tedy k celkovému navýšení přibližně o 80 %. V hydrodynamickém režimu vliv texturovaného povrchu s narůstajícím zatížením postupně klesal. Během zatížení 50 N tření v daném režimu celkově stoupl o 16 % a při zatížení 70 N to už bylo pouze o 8,5 %.

U fluorovaného maziva způsobovalo postupné navyšování zatížení mírný nárůst vlivu texturovaného povrchu na tření a během zatížení 50 N zde hodnoty celkově stouply o 9 %.



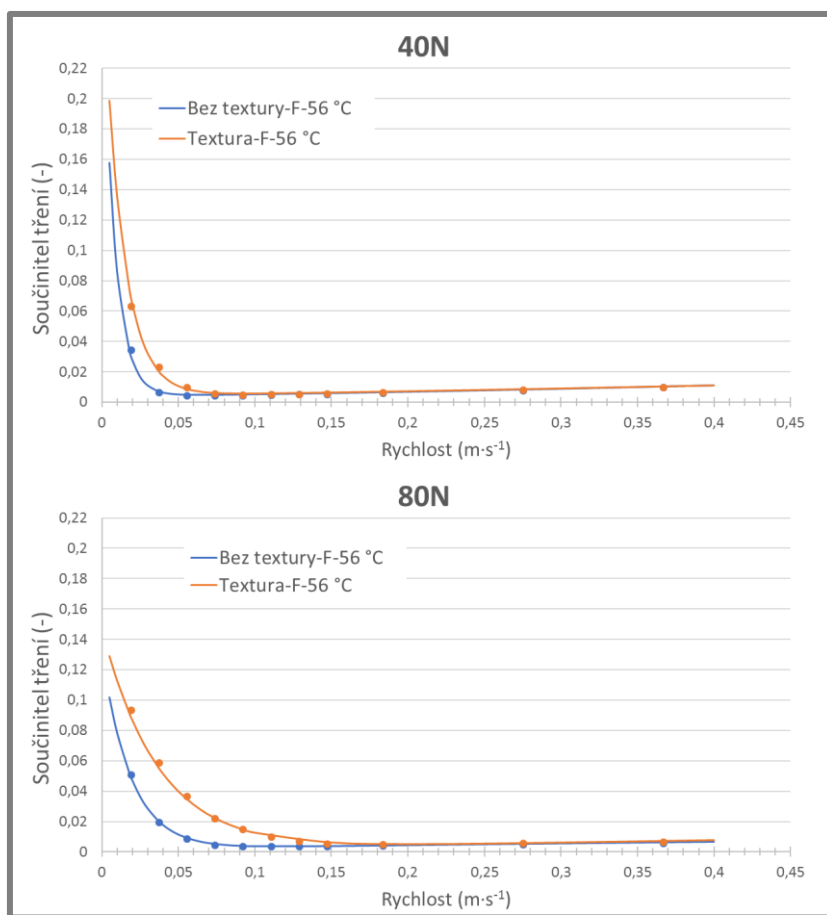
Obr. 5-8 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 50 a 70 N; viskozita: 53,4 a 416 mPa·s)

V následující tabulce (Tab. 5-1) jsou shrnuty změny způsobené vlivem texturovaného povrchu v porovnání s hladkým povrchem pro experimenty s mazivem HC a F.

Tab. 5-1 Změny vlivem texturovaného povrchu v porovnání s hladkým povrchem (mazivo HC a F)

	Posun přechodu mezi režimy	Navýšení tření ve smíšeném režimu	Navýšení tření v hydrodynamickém režimu
20 N-HC	56 %	58 %	41 %
40 N-HC	87 %	78 %	19 %
50 N-HC	94 %	80 %	16 %
70 N-HC	107 %	80 %	8,5 %
20 N-F			5 %
40 N-F			6 %
50 N-F			9 %

Z předešlých experimentů vyplynul závěr, že nejvýraznější vliv na výsledné hodnoty tření mají texturey na přechodu ze smíšeného režimu mazání do režimu hydrodynamického, čehož bylo dosaženo u minerálního oleje HC s dynamickou viskozitou 53,5 mPa·s při teplotě 23 °C. Daná oblast provozních podmínek se tedy ukázala jako nejvhodnější pro testování s využitím optického pozorování, s cílem přesněji popsat mechanismy způsobující negativní vliv vytvořených vtisků. Jelikož pro experimenty s využitím metody optické interferometrie je výhodnější použít fluorované mazivo F (vyšší rozdíl indexů lomu na rozhraní mazivo-safír), pomocí kterého jsou výsledné interferogramy kontrastnější, přešlo se v dalším průběhu práce k experimentům právě s fluorovaným mazivem, které se ohřálo na teplotu 56 °C, čímž bylo dosaženo dynamické viskozity přibližně 78 mPa·s. Cílem bylo dosáhnout podobné dynamické viskozity jako u minerálního oleje HC, což umožnilo pozorovat přechod mezi smíšeným a hydrodynamickým mazacím režimem i u fluorovaného maziva.



Obr. 5-9 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 40 a 80 N; viskozita: 78 mPa·s)

Testy probíhaly při zatížení 40 a 80 N a rychlost otáčení byla opět skokově navyšována v rozmezí 0-200 ot·min⁻¹ (0-0,4 m·s⁻¹). Byly získány podobné výsledky (Obr. 5-9) jako u předešlých experimentů. U obou zatížení se objevil přechod mezi smíšeným a hydrodynamickým režimem mazání a vlivem texturovaného povrchu docházelo vždy k jeho posunu na vyšší rychlost otáčení (pro 40 N posun o 60 % a pro 80 N posun o 97 %). Při zatížení 40 N se ve smíšeném režimu vlivem textur celkově hodnoty tření

vzhledem k hladkému vzorku zvýšily přibližně o 69 % a v hydrodynamickém režimu o 17,5 %. Navýšení zatížení na hodnotu 80 N se projevilo ještě výraznějším nárůstem celkového tření ve smíšeném režimu (nárůst o 101 % oproti hladkému vzorku) a mírným snížením nárůstu v hydrodynamickém režimu (nárůst o 16,4 % oproti hladkému vzorku). Jednotlivé změny jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 5-2).

Tab. 5-2 Změny vlivem texturovaného povrchu v porovnání s hladkým povrchem (mazivo F-56 °C)

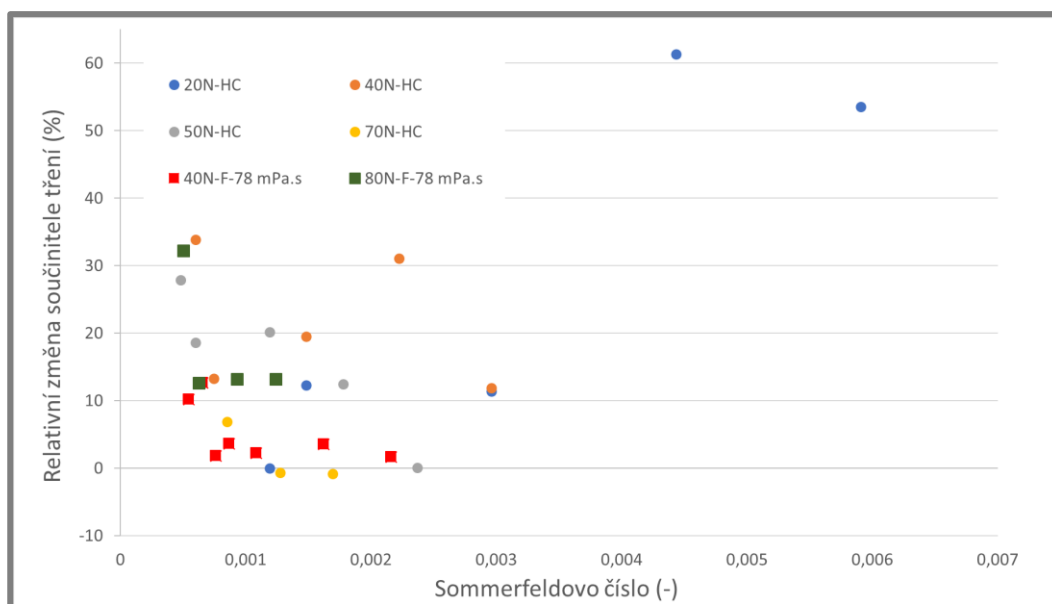
	Posun přechodu mezi režimy	Navýšení tření ve smíšeném režimu	Navýšení tření v hydrodynamickém režimu
20 N-F-56 °C	60 %	69 %	17,5 %
40 N-F-56 °C	101 %	78 %	16,4 %

5.2.2 Vliv textur na součinitel tření v hydrodynamickém režimu mazání

Následující kapitola je věnována podrobnému rozboru relativních změn součinitele tření vlivem texturovaného povrchu pro provozní podmínky, při kterých docházelo k hydrodynamickému režimu mazání.

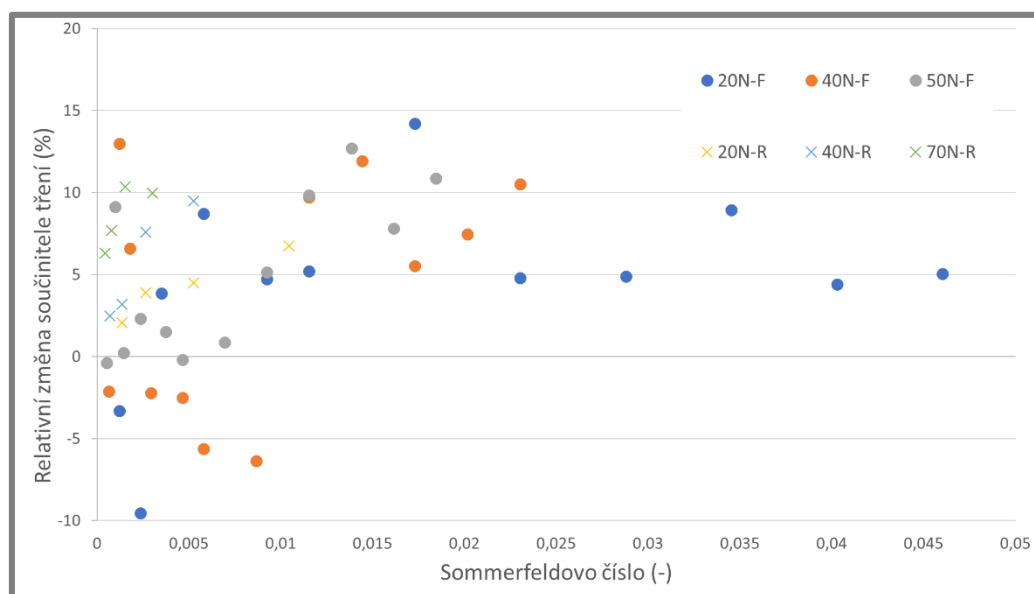
Na následujícím grafu (Obr. 5-10) jsou znázorněny relativní změny v závislosti na Sommerfeldově čísle pro oleje s nízkou viskozitou (HC-54,5 mPa·s a F-78 mPa·s). Kladná procenta představují navýšení hodnot tření vlivem vtisků a záporná naopak snížení. Z grafu vyplývá, že při aplikování minerálního oleje HC se navyšováním zatížení postupně snižuje negativní vliv texturovaného povrchu na hodnoty tření. Nejvýraznější relativní změny byly zjištěny u nejnižšího zatížení (20 N) a nejvyšších rychlostí, kde docházelo až k 60% nárůstu hodnot tření. Následným navyšováním zatížení se relativní změny postupně snižovaly a při dosažení 50 N už byly hodnoty tření u obou vzorků téměř totožné, což se následně potvrdilo i u zatížení 70 N, kde se objevovaly pouze minimální relativní změny (maximálně 8 %).

Využitím oleje F (při teplotě 56 °C) s mírně vyšší viskozitou už byl však trend opačný a s narůstajícím zatížením se naopak relativní změny navyšovaly.



Obr. 5-10 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (mazivo HC-53,4 mPa·s a F-78 mPa·s)

Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání byly následně pozorovány i při aplikaci olejů s vysokou dynamickou viskozitou (F-416 mPa·s a R-470 mPa·s). Z následujícího grafu (Obr. 5-11) je zřejmý podobný trend z předešlého vyhodnocení, kde se vlivem zvýšené viskozity objevují celkově nižší relativní změny oproti olejům s nižší viskozitou. Hodnoty tření se zde maximálně navýšily o 15 %, což v porovnání s maximálními změnami u minerálního oleje HC (63 %) je až čtyřnásobně menší navýšení. Minimálních relativních změn bylo dosahováno při nejnižších rychlostech otáčení a nejnižším zatížení, kde docházelo i k mírnému snížení hodnot tření vlivem texturovaného povrchu. Následným navyšováním zatížení a rychlostí se hodnoty relativních změn postupně navyšovaly a dosažením určitých rychlostí se následně ustálily.



Obr. 5-11 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (mazivo F-416 mPa·s a R-470 mPa·s)

5.3 Vliv texturovaného povrchu na tloušťku mazacího filmu

5.3

V průběhu předešlých experimentů bylo zjištěno, že vytvořené textury mají nejvýraznější vliv na výsledné hodnoty tření v oblasti přechodu mezi smíšeným a hydrodynamickým režimem mazání. V další části bylo tedy cílem zjistit, jak v dané oblasti provozních podmínek vtisky ovlivňují tloušťku mazacího filmu. Vyhodnocené výsledky byly současně propojovány s hodnotami součinitele tření, které byly zjištěny v předešlé části práce.

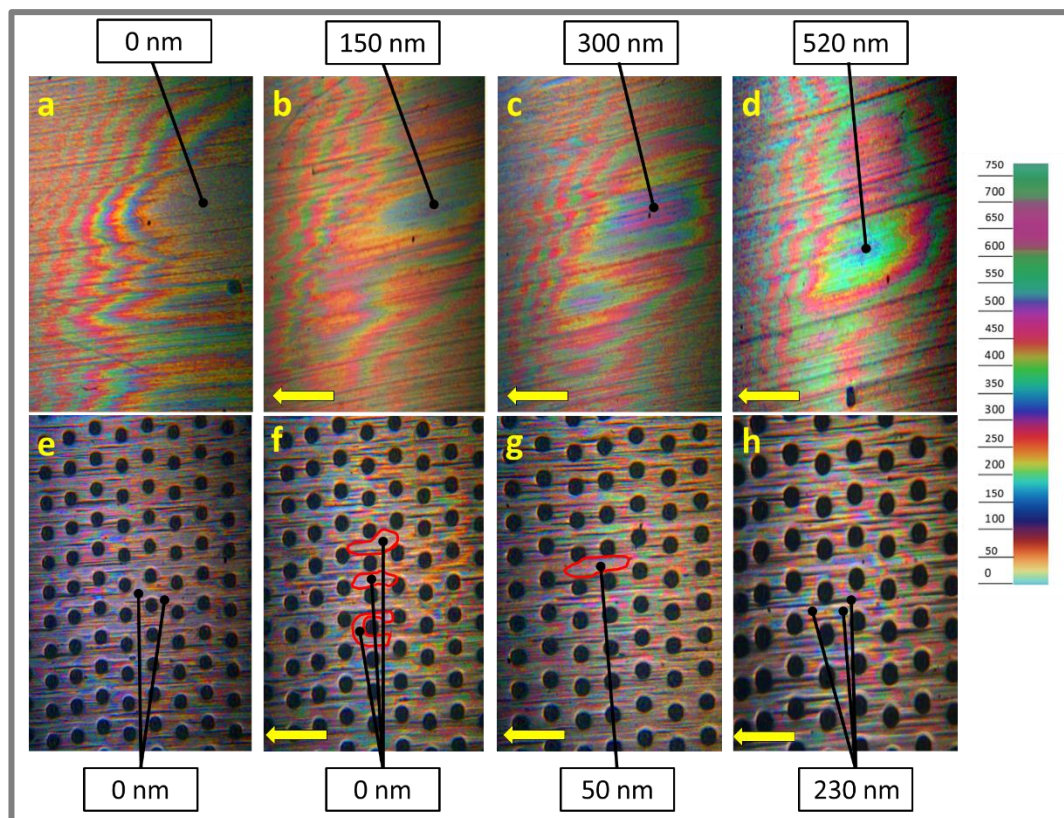
5.3.1 Tloušťka mazacího filmu v kontaktní oblasti

5.3.1

Optická interferometrie

Experimenty probíhaly za přítomnosti fluorovaného maziva F ohřátého na teplotu 56 °C (viskozita 78 mPa·s) při stejných provozních podmínkách jako měření tření (viz kapitola 5.2.1). Pouze rychlost otáčení byla navyšována v rozmezí (10-60) ot·min⁻¹ (0,018-0,1 m·s⁻¹), jelikož v dané oblasti měly vtisky nejvýraznější vliv na výsledné hodnoty a při vyšších rychlostech už byly získané snímky nevyhodnotitelné.

Na následujícím obrázku (Obr. 5-12) jsou zobrazeny jednotlivé interferogramy hladkého (Obr. 5-12 a, b, c, d) a texturovaného vzorku (Obr. 5-12 e, f, g, h) při zatížení 40 N a rozmezí rychlostí (0,018-0,055) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, kde směr pohybu značí žluté šipky. Jelikož měřené vzorky neměly povrch opatřený chromovou vrstvou, nebyly získané interferogramy s výrazným interferenčním kontrastem, a proto byly snímky postprocesovány, kde byla navyšována hodnota saturace a kontrastu v programu GIMP. Zejména u texturovaných vzorků byly barvy pro vyhodnocení tloušťky rozeznatelné pouze na určitých místech.



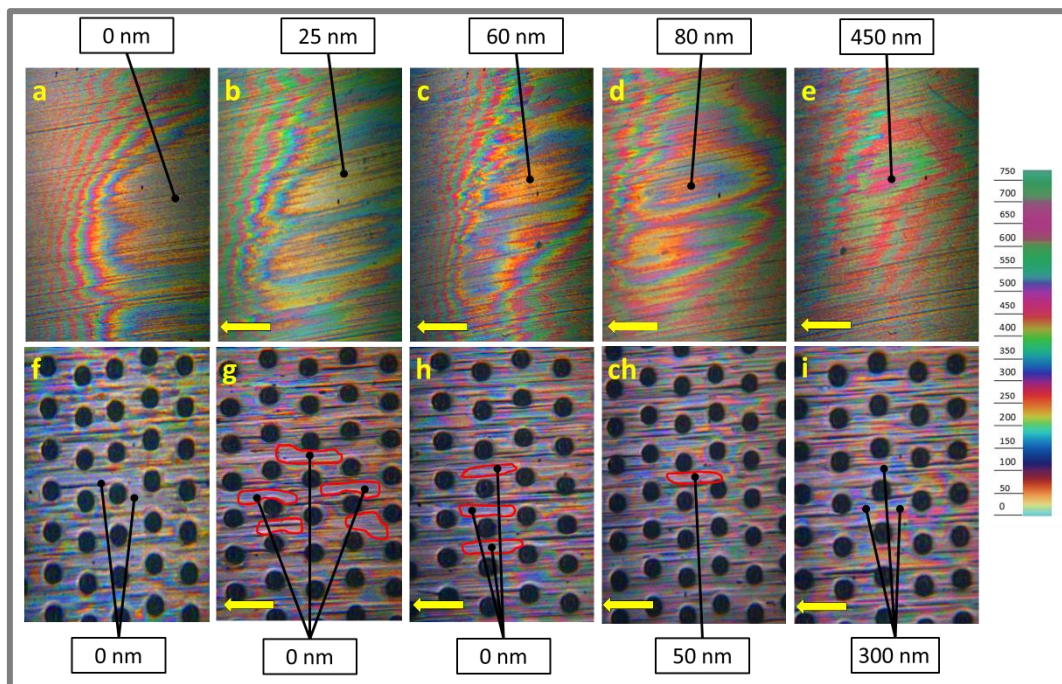
Obr. 5-12 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 40 N a viskozitě 78 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b-0,018 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, c-0,037 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, d-0,055 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Texturovaný vzorek: e-statický kontakt, f-0,018 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, g-0,037 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, h-0,055 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Během rychlosti 0,018 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-12 b) se u hladkého vzorku nacházel v kontaktu film maziva o tloušťce přibližně 150 nm. U texturovaného vzorku (Obr. 5-12 f) se však při stejných provozních podmínkách objevovaly oblasti (značené červenou barvou) s nulovou tloušťkou filmu maziva. Texturovaný povrch zde tedy způsobil snížení tloušťky maziva v porovnání s hladkým povrchem o 150 nm. S narůstající rychlostí otáčení se tloušťka u hladkého vzorku navyšovala: 0,037 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-12 c) – 300 nm a 0,055 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-12 d) - 520 nm. U vzorku s vtisky se i při zvýšené rychlosti (0,037 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Obr. 5-12 g) nacházely v kontaktu oblasti s nízkou tloušťkou filmu maziva (50 nm) a došlo zde vlivem vtisků k poklesu o 250 nm. Při rychlosti 0,055 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-12 h) byla už celá kontaktní oblast zaplavena mazivem o tloušťce 230 nm.

V porovnání s měřením tření (Obr. 5-9 zatížení 40 N) vtisky při rychlosti 0,018 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ navyšovaly tření přibližně o 120 %, čemuž odpovídají i vzniklé oblasti

s nulovou tloušťkou filmu maziva. Navýšením rychlosti na hodnotu $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byly u hladkého vzorku povrchy odděleny značně tlustým filmem maziva, což se projevilo poklesem tření. U texturovaného vzorku se však i při této rychlosti objevovaly oblasti s nižší tloušťkou mazací vrstvy a zatížení tak bylo stále přenášeno stykem povrchů, což se projevilo i vyšším nárůstem (180 %) hodnot tření vlivem vtisků. U vyšší rychlosti ($0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) se už u obou vzorků v kontaktu nacházel souvislý film maziva, což se projevilo i výrazným poklesem nárůstu tření.

Na Obr. 5-13 jsou znázorněny výsledky pro zatížení 80 N. Zvýšením zatížení se tloušťka maziva oproti předchozímu měření při jednotlivých rychlostech snížila. Během rychlosti $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-13 b) dosahovala u hladkého vzorku tloušťka filmu maziva v kontaktu hodnoty přibližně 25 nm. U texturovaného vzorku však opět většinu plochy kontaktu pokrývaly oblasti s nulovou tloušťkou a došlo zde tedy vlivem vtisků ke snížení tloušťky o 25 nm. Postupným navyšováním rychlosti tloušťka u hladkého vzorku vzrostla: $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-13 c) - 60 nm, $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-13 d) - 80 nm a $0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-13 e) - 450 nm. U texturovaného vzorku byla i při zvýšené obvodové rychlosti ($0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Obr. 5-13 h) velká část kontaktu pokryta oblastmi s nulovou tloušťkou filmu maziva, což způsobilo pokles tloušťky oproti hladkému vzorku o 60 nm. Dosažením rychlosti $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se tloušťka filmu u texturovaného povrchu navýšila na hodnotu 50 nm a při rychlosti $0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ už byly oba povrchy odděleny souvislým filmem maziva o tloušťce 300 nm.



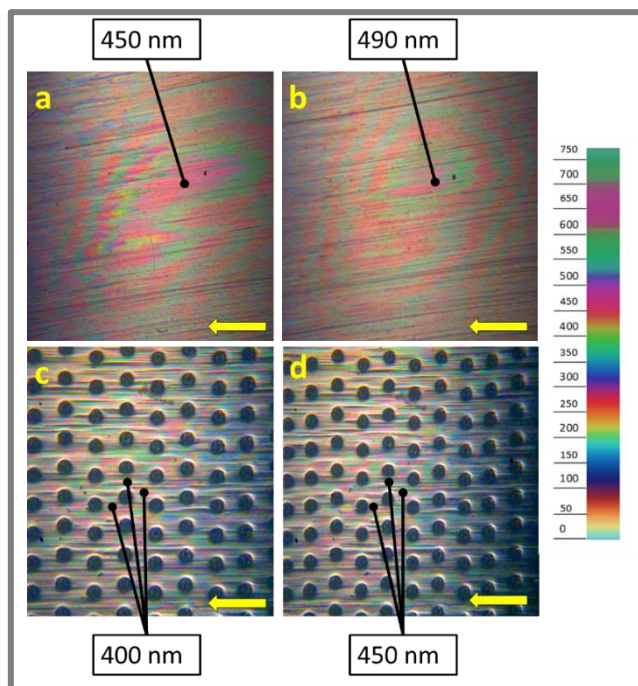
Obr. 5-13 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 80 N a viskozitě 78 mPa·s (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d- $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e- $0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Texturovaný vzorek: f-statický kontakt, g- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, h- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, i- $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, i- $0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

V porovnání s měřením tření (Obr. 5-9 zatížení 80 N) při rychlosti $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vycházely u obou vzorků značně vysoké hodnoty součinitele tření, čemuž odpovídá i velmi nízká tloušťka filmu maziva. U texturovaných vzorků byla navíc v téměř celé

kontaktní oblasti nulová tloušťka a vtisky zde způsobily navýšení tření o 80 %. Navyšováním obvodové rychlosti ($0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ resp. $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) u hladkého vzorku tloušťka filmu postupně rostla, ale u texturovaného vzorku se v kontaktu stále nacházely oblasti s nulovou resp. nízkou tloušťkou, což se projevilo stále výraznější změnou hodnot tření (nárůst tření o 170 % resp. 270 %). Následným zrychlováním ($0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) se i u texturovaného vzorku povrchy postupně oddělovaly souvislým filmem maziva a experiment tak postupně přecházel do hydrodynamického režimu.

Prostřednictvím optické interferometrie byly dále proměřeny provozní podmínky, při kterých experimenty probíhaly v hydrodynamickém režimu mazání. K daným testům bylo použito fluorované mazivo F, ale už nedocházelo k jeho ohřevu a tak jeho viskozita v době měření byla přibližně $416 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Během testů na vzorky působilo zatížení 50 N a rychlost otáčení se skokovitě navýšovala v rozmezí $(0,018\text{--}0,11) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, avšak pozorování tloušťky filmu maziva bylo realizováno pouze pro rychlosti $0,018$ a $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, jelikož tloušťka u vyšších rychlostí už značně stoupla a nebylo možné získané interferogramy vyhodnotit.

Získané výsledky je možné vidět na následujícím obrázku (Obr. 5-14). Už při nejnižší rychlosti otáčení ($0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) se u hladkého vzorku v kontaktu objevoval velmi tlustý film maziva o hodnotě až 450 nm . Následným navýšením rychlosti tloušťka opět vzrostla (490 nm) a stejný trend pokračoval i při následném zrychlování. U texturovaných vzorků bylo rovněž dosahováno podobných výsledků a neobjevovaly se zde oblasti s minimální tloušťkou, jak tomu bylo u předešlých experimentů s nižší viskozitou. Hodnoty se zde vlivem vtisků snížily maximálně o 50 nm a vzhledem k vysoké tloušťce maziva nemělo toto snížení výraznější vliv na hodnoty tření (Obr. 5-8), u kterých docházelo pouze k mírnému zhoršení hodnot vlivem vtisků.



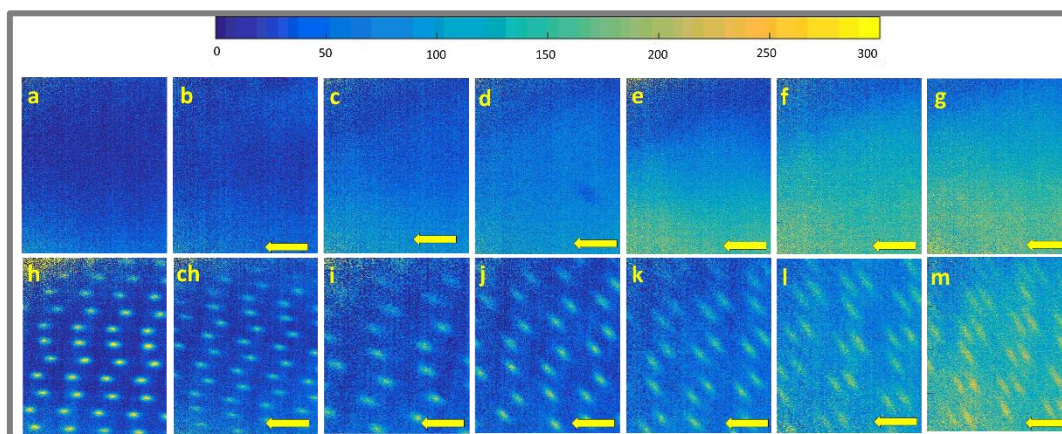
Obr. 5-14 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 50 N a viskozitě $416 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (Hladký vzorek: a- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Texturovaný vzorek: c- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fluorescence

Z předešlé kapitoly vyplynul poznatek, že pokud není povrch vzorků opatřen chromovou vrstvou, je značně obtížné pomocí optické interferometrie vyhodnocovat tloušťku maziva u texturovaných vzorků, jelikož získané interferogramy mají velice nízký interferenční kontrast. Z daného důvodu se přešlo k využití metody fluorescence, u které se tloušťka maziva vyhodnocuje fluorescenčně na základě intenzity světla emitované mazivem v kontaktu. Tato metoda byla využita z důvodu její vhodnosti pro texturované (drsne povrchy) a vyššího rozsahu měřených tloušťek, čímž bylo možné získat další informace o mazaném filmu.

K danému měření byl využit olej HC ($53,4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), jelikož oproti fluorovanému mazivu F má minerální olej schopnost přirozené fluorescence. Experimenty byly realizovány při zatížení 20 a 70 N a rychlost otáčení se skokově navyšovala v rozmezí $(0-0,18) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Cílem bylo změřit oblast přechodu mezi smíšeným a hydrodynamickým režimem, kde byl během měření tření (Obr. 5-7 a Obr. 5-8) zjištěn nejvýraznější vliv vtisků na výsledné hodnoty.

Na následujícím obrázku (Obr. 5-15) jsou zobrazeny kontaktní oblasti pro dva použité vzorky (s vtisky a bez vtisků) při jednotlivých rychlostech a zatížení 20 N. Jak je možné vidět, s narůstající rychlostí otáčení se navyšovala intenzita světla, čemuž odpovídalo i navýšení tloušťky filmu maziva, lze tedy předpokládat lineární závislosti intenzity na tloušťce. U texturovaných vzorků je patrná velmi silná intenzita světla v jednotlivých vtiscích, což ukazuje, že se v nich nachází mazivo. V okolí vtisků jsou však viditelné tmavé oblasti, což naznačuje, že se zde naopak nacházely velmi nízké hodnoty tloušťky filmu. Dané snímky byly následně získány i pro zatížení 70 N. Z jednotlivých snímků je patrné natočení a rozmazání vtisků při vyšších obvodových rychlostech. Tyto změny jsou zapříčiněny způsobem vyčítání „rolling shutter“, kterým kamera zaznamenává obraz (viz kapitola 4.3.2).



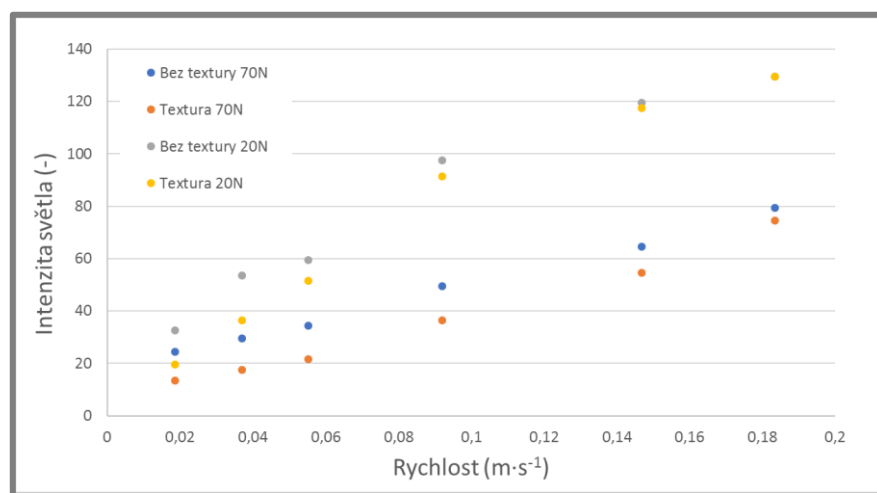
Obr. 5-15 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 20 N a viskozitě $53,4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d- $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e- $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, f- $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, g- $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; Texturovaný vzorek: h-statický kontakt, ch- $0,018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, i- $0,037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, j- $0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, k- $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, l- $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, m- $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Hodnoty intenzity světla získané ze softwaru Matlab byly zaneseny do grafu (Obr. 5-16) v závislosti na rychlosti otáčení. Z grafu je zřejmé, že při nejnižších rychlostech byla v oblastech mezi vtisky získána nižší intenzita světla než v kontaktní oblasti hladkého vzorku. U obou zatížení zde došlo vlivem texturovaného povrchu k poklesu intenzity přibližně o 40 %, což implikuje stejnou změnu i u tloušťky

mazacího filmu. Dané snížení tloušťky odpovídá výsledkům získaným prostřednictvím optické interferometrie, kde se při daných provozních podmínkách objevovaly oblasti s nulovou tloušťkou filmu. S narůstající rychlostí se intenzity u obou vzorků postupně vyrovnávaly, což odpovídá sblížováním tloušťky u interferenčních experimentů.

Při zatížení 20 N se dosažením rychlosti $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ hodnota intenzity světla vlivem vtisků snížila pouze o 8 % a při rychlosti $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byly hodnoty u obou vzorků téměř totožné. Při porovnání s měřením tření (Obr. 5-7 zatížení 20 N) se dosažením rychlosti $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ u obou vzorků objevoval hydrodynamický režim mazání a byly zde viditelné pouze minimální změny tření.

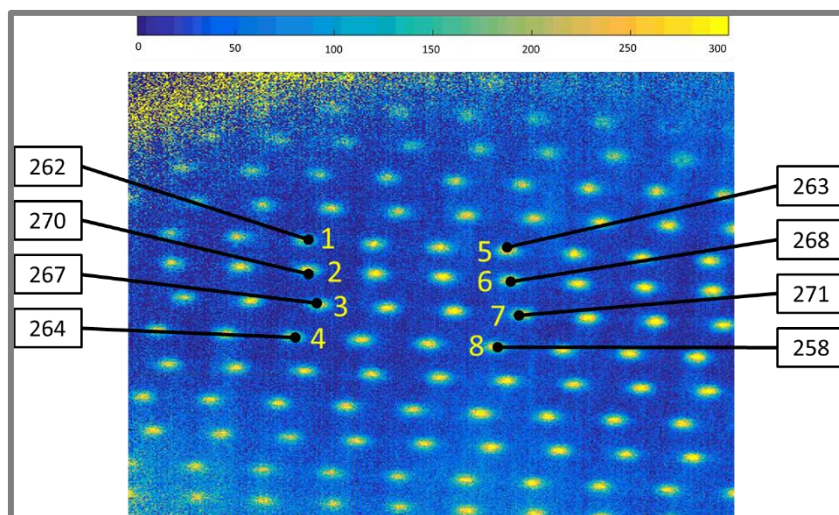
U vyššího zatížení (70 N) se objevovalo vlivem vtisků mírné snížení hodnot intenzity světla i při nejvyšších rychlostech, což odpovídá výsledkům tření, kde bylo pozorováno vyšší tření u texturovaného vzorku i při rychlosti $0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 5-8 zatížení 70 N) oproti nižšímu zatížení. Z grafu rovněž vyplynula závislost tloušťky maziva na zatěžující síle, kde jejím navýšením byly celkově získávány mnohem nižší hodnoty intenzity světla. Tento trend odpovídá teoretickým předpokladům.



Obr. 5-16 Závislost intenzity světla na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení 20 a 70 N, viskozita $53,4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)

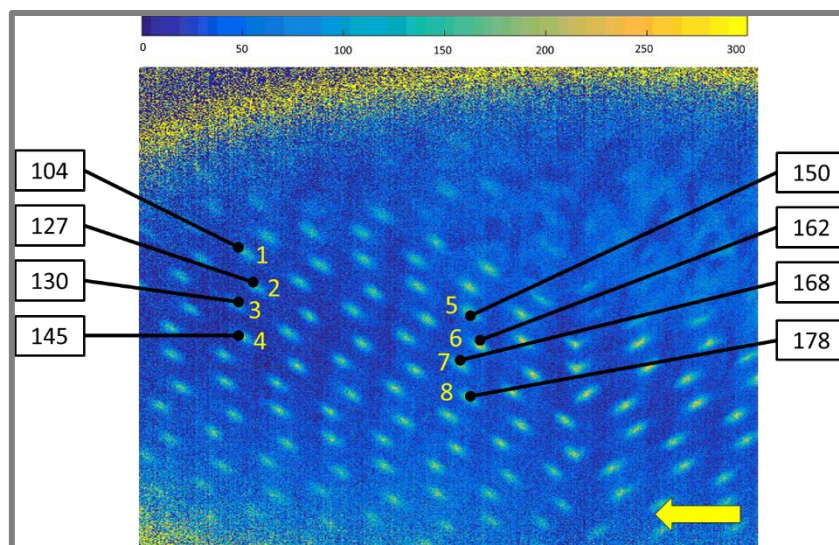
5.3.2 Množství maziva v jednotlivých vtiscích

Prostřednictvím fluorescence bylo pozorováno rozložení množství maziva v jednotlivých vtiscích. Na následujícím obrázku (Obr. 5-17) je znázorněn statický kontakt u texturovaného vzorku při zatížení 70 N. K měření byl vždy vybrán sloupec vtisků nacházejících se blíže středu kontaktu (označeny číslicí 1-4) a v delší vzdálenosti od středu kontaktu (označeny číslicí 5-8). Vyhodnocením intenzity světla se ukázalo, že během statického kontaktu obsahovaly všechny vybrané vtisky přibližně stejné množství maziva (změna intenzity maximálně o 2 %), čímž bylo ověřeno, že snímaná oblast je homogenně osvětlena a jednotlivé vtisky mají porovnatelný objem (průměrnou hloubku). Pokud by se hodnoty intenzity v jednotlivých vtiscích během statického kontaktu značně lišily, znamenalo by to, že pozorovaná oblast nebyla v průběhu měření rovnoměrně osvětlena.



Obr. 5-17 Hodnota intenzity světla v jednotlivých vtiscích ve statickém kontaktu texturovaného vzorku při zatížení 70 N

Při vyhodnocování intenzity světla v jednotlivých vtiscích během určité rychlosti otáčení byly zjištěny značné rozdíly mezi sledovanými řadami vtisků (Obr. 5-18). U vtisků nacházejících se ve větší vzdálenosti od středu kontaktu dosahovala intenzita v průměru o 20 % vyšších hodnot oproti vtiskům nacházejícím se blíže středu kontaktu. S narůstající rychlostí se velikost změny intenzity výrazně neměnila.



Obr. 5-18 Hodnota intenzity světla v jednotlivých vtiscích při zatížení 70 N a rychlosti $0,055 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

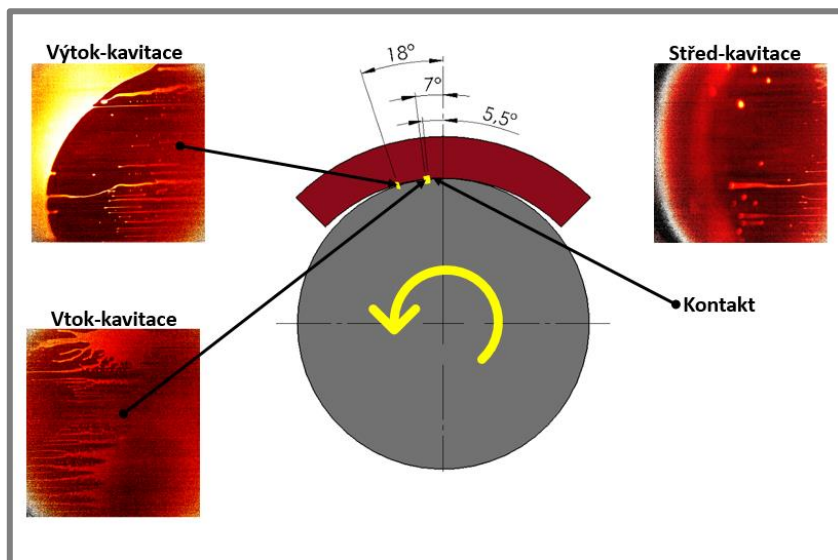
5.4 Pozorování kontaktní a kavitační oblasti

5.4

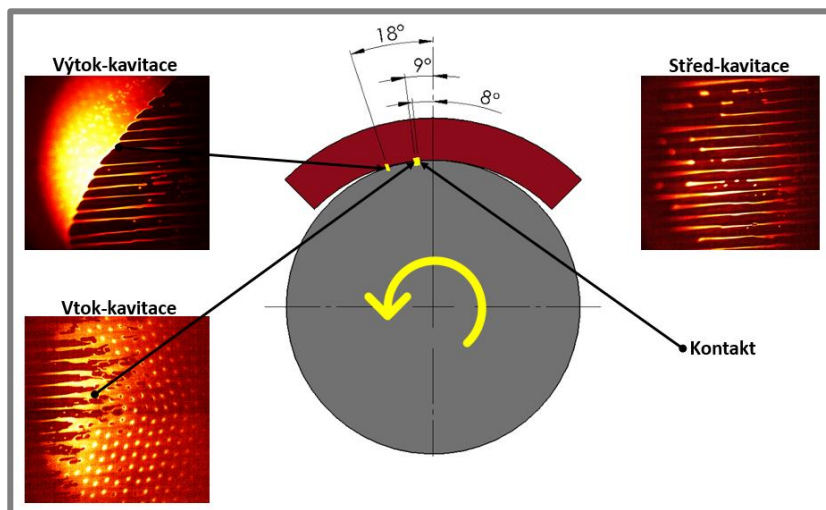
Na následujících obrázcích je znázorněna kontaktní a kavitační oblast pro hladký (Obr. 5-19) a texturovaný vzorek (Obr. 5-20). Držák upevňující fluorescenční aparaturu k měřicímu modulu umožňoval příčný posuv a tím i možnost pozorovat začátek kavitační oblasti na výstupu, což je efektivní konec tlakové oblasti, která tvoří únosnost filmu. Experiment probíhal při zatížení 70 N a rychlosti $0,018 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledky ukázaly, že u hladkého vzorku došlo k posunu místa maximálního tlaku od

středu ve směru otáčení o úhel přibližně $5,5^\circ$. U texturovaného vzorku se tento posun navýšil až na hodnotu 8° .

Změny byly rovněž pozorovány i v kavitační oblasti. Ze snímků je patrné, že u hladkého vzorku byla kavitací pokryta téměř celá oblast. U texturovaného vzorku se však kavitace objevovala pouze v místech jednotlivých řad vtisků a zbylé oblasti mezi těmito řadami, které neobsahovaly vtisky, byly zaplaveny mazivem. Z daného měření plyne, že vytvořené vtisky ovlivňují tvar vzniklé kavitace. Z hlediska vlivu textur na hodnoty tření však není tato oblast důležitá a je nutné se zaměřit na kavitaci vznikající přímo v kontaktní oblasti.



Obr. 5-19 Kontaktní a kavitační oblast u hladkého vzorku

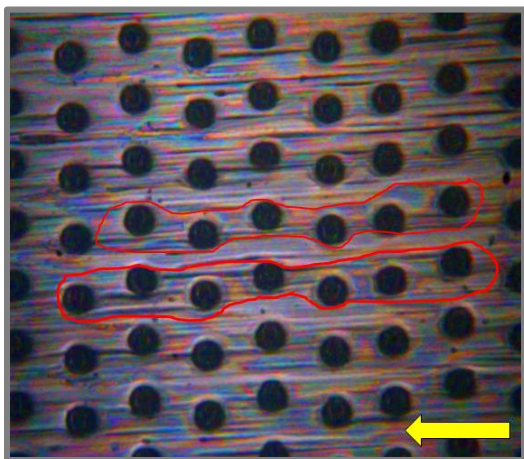


Obr. 5-20 Kontaktní a kavitační oblast u texturovaného vzorku

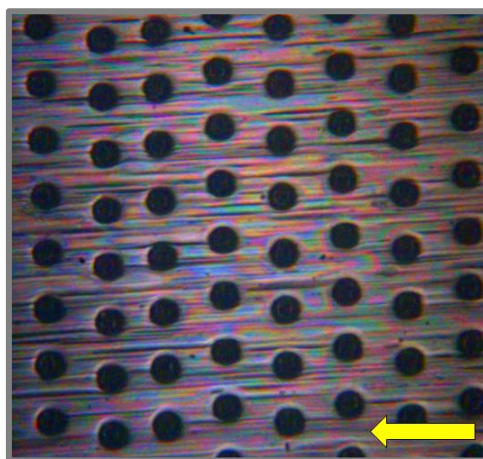
5.5 Lokální pozorování tloušťky maziva u texturovaného povrchu

Tato kapitola je věnována podrobnému rozboru utváření mazacího filmu u texturovaných povrchů. Pro zkoumání byly využity videozáznamy získané prostřednictvím optické interferometrie.

V první části bylo nutné se blíže zaměřit na oblasti s nulovou tloušťkou filmu maziva, které byly odhaleny u texturovaných vzorků ve smíšeném režimu mazání. Na následujícím snímku (Obr. 5-22) je znázorněna kontaktní oblast texturovaného vzorku za provozních podmínek, u kterých je možné na základě měření tření říci, že docházelo ke smíšenému režimu mazání (80 N , $0,018\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a viskozita $53,4\text{ mPa}\cdot\text{s}$). Během nejnižších rychlostí otáčení se v kontaktní oblasti nacházelo jen velmi malé množství maziva. Z daného snímku je patrné, že mazivo je přítomno pouze v řadě vtisků (oblasti ohraničené červenými čarami). Se zvyšující rychlostí (Obr. 5-21) docházelo následně k nárůstu tloušťky i v oblastech mezi texturami.

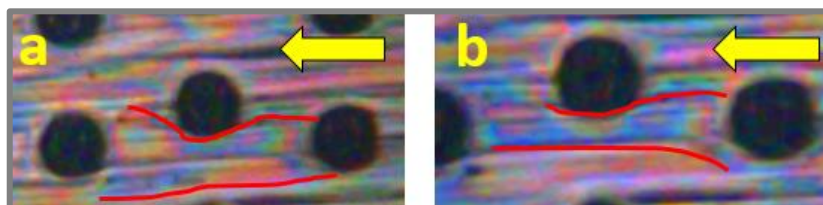


Obr. 5-22 Přítomnost maziva pouze v řadě vtisků



Obr. 5-21 Zaplavení kontaktu mazivem při vyšších rychlostech otáčení

Při vyšší rychlosti, kdy byl kontakt stále ve smíšeném režimu mazání, se za některými vtisky začaly objevovat oblasti s lokálním navýšením tloušťky filmu maziva, které zasahovalo až k dalšímu vtisku. Na Obr. 5-23a je zobrazena oblast za vtiskem (ohraničena červenými čarami) v místě vtoku do kontaktu. Následně na Obr. 5-23b je stejná oblast nacházející se už blíže středu kontaktu, kde je možné vidět navýšení tloušťky až o téměř 50 nm .



Obr. 5-23 Lokální navýšení tloušťky mazacího filmu za vtiskem (a-oblast na vtoku do kontaktu, b- stejná oblast nacházející se blíže středu kontaktu)

6 DISKUZE

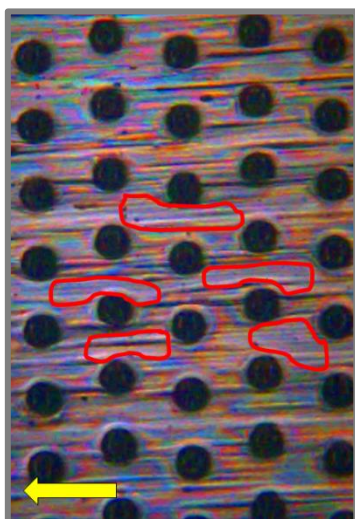
6.1 Vliv textur na koeficient tření a tloušťku mazacího filmu

Během měření tření se ukázalo, že využitím maziva o nízké dynamické viskozitě (53,4 a 78 mPa·s) nastává při nejnižších rychlostech smíšený režim mazání a postupným navyšováním rychlosti se přechází do režimu hydrodynamického. Naopak aplikováním maziva s vysokou dynamickou viskozitou (416 a 470 mPa·s) vycházely nízké hodnoty součinitele tření už od nejnižších rychlostí otáčení a celý experiment tak probíhal pouze v hydrodynamickém režimu.

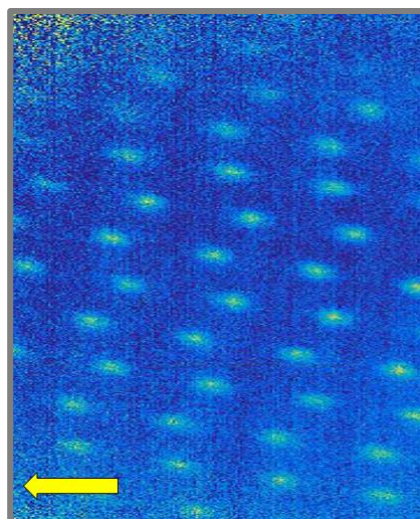
6.1.1 Vliv textur ve smíšeném režimu mazání

Ve smíšeném režimu mazání způsoboval texturovaný povrch výrazné navýšení hodnot tření. Vliv textur byl velice závislý na velikosti zatížení, s jehož nárůstem docházelo ke stále výraznějšímu navýšení hodnot tření. S nárůstem tření rovněž souvisí i posuv přechodu mezi mazacími režimy, který se s navyšujícím zatížením a vlivem vtisků posouval stále na vyšší hodnoty obvodových rychlostí. Z provedených experimentů tedy vyplynul velice negativní vliv textur na hodnoty ve smíšeném režimu mazání, kde při nejvyšších zatíženích (80 N) docházelo k celkovému nárůstu tření až o téměř 100 %.

Prostřednictvím optické interferometrie bylo zjištěno, že vtisky při těchto provozních podmínkách značně snižují tloušťku mazacího filmu. V kontaktní oblasti texturovaného vzorku (Obr. 6-1) se objevovala místa (označená červenou barvou) s nulovou tloušťkou mazací vrstvy. Stejně výsledky byly potvrzeny i pomocí fluorescenční metody (Obr. 6-2), kde se při stejných provozních podmínkách nacházely mezi vtisky tmavé oblasti s výrazně nižší intenzitou světla (resp. tloušťkou maziva) oproti hladkému vzorku. Z tohoto důvodu byla u texturovaného vzorku větší část zatížení přenášena přímým stykem povrchů (se součinitelem mezného tření 0,25), což vedlo k navýšení tření.



Obr. 6-1 Místa s nulovou tloušťkou maziva v kontaktní oblasti texturovaného vzorku (optická interferometrie-80N; 0,018 m·s⁻¹ a 78 mPa·s)



Obr. 6-2 Nízká intenzita světla v oblastech okolo vtisků (fluorescence-80N; 0,018 m·s⁻¹ a 53,4 mPa·s)

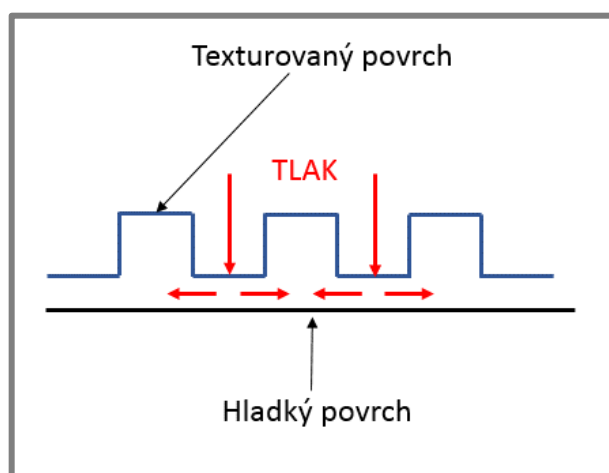
I vzhledem k vysoké konformitě kontaktních těles použitých v dané práci může při nejnižších obvodových rychlostech docházet k jejich kontaktu na velmi malé ploše. Zatížení, které je přenášeno na takto malé ploše, způsobuje navýšení tlaku na hodnoty, při kterých nastává vznik elastických deformací. V takovém případě se jedná o elasto-hydrodynamický režim mazání (EHD). Vznik daného režimu lze vyjádřit i na základě parametru mazání Λ , který dává do vztahu minimální tloušťku mazacího filmu s průměrnou kvadratickou odchylkou profilu kontaktních těles. Texturovaný povrch snižuje tloušťku maziva a zvyšuje vlivem úpravy povrchu hodnoty průměrné kvadratické úchlky profilu tělesa. Tyto změny vedou ke snížení hodnoty parametru mazání, z čehož vyplývá zvýšení možnosti vzájemné interakce třecích povrchů.

$$\Lambda = \frac{h_o}{\sqrt{R_{qa}^2 + R_{qb}^2}} \quad (8)$$

kde:

h_o	μm	minimální tloušťka mazacího filmu
R_{qa}	μm	průměrná kvadratická úchlka profilu tělesa a
R_{qb}	μm	průměrná kvadratická úchlka profilu tělesa b

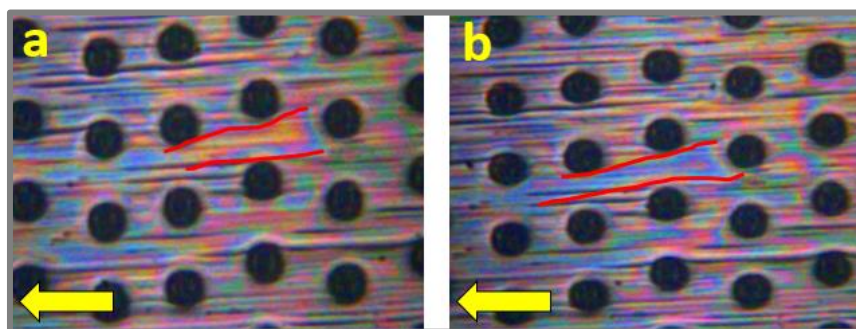
Vzhledem k nízkým rychlostem se v kontaktní oblasti nacházelo malé množství maziva, které bylo navíc vlivem zatížení vytlačováno (Obr. 6-3) z prostoru mezi vtisky (oblasti s vysokým tlakem) do jednotlivých textur (nižší tlak). U hladkých vzorků se postupným navyšováním rychlosti tloušťka filmu navyšovala, ale u texturovaných vzorků docházelo při stejných rychlostech stále ke styku povrchů, což odpovídalo posunu přechodu mezi jednotlivými mazacími režimy. Daný posun je způsoben tvarem texturovaného povrchu, který má vzhledem k malým rádiům vtisků větší tuhost oproti hladkému povrchu, což snižuje schopnost povrchu se snadněji deformovat. Tento výsledek odpovídá studiím [9,10], kde autoři rovněž došli k závěrům, že vtisky s nevhodně zvolenými parametry mohou zvyšovat hodnoty tření při nízkých rychlostech, při kterých nastává smíšený režim mazání.



Obr. 6-3 Kontakt hladkého a texturovaného povrchu

S narůstající rychlostí se v kontaktu nacházelo stále větší množství maziva a oblasti s nulovou tloušťkou postupně vymizely. Tomu odpovídaly i hodnoty tření, které se s narůstající rychlostí výrazně snižovaly a nebylo už pozorováno tak značné navýšení měřených hodnot vlivem texturovaného povrchu. Rychlost, při které docházelo u texturovaného vzorku k plnému oddělení povrchů souvislým filmem, závisela na velikosti zatížení. Vlivem vyššího zatížení a tuhosti texturovaného vzorku se oproti hladkému povrchu přechod mezi mazacími režimy posouval a oblasti s nulovou tloušťkou se u texturovaného povrchu vyskytovaly i při vyšších rychlostech otáčení.

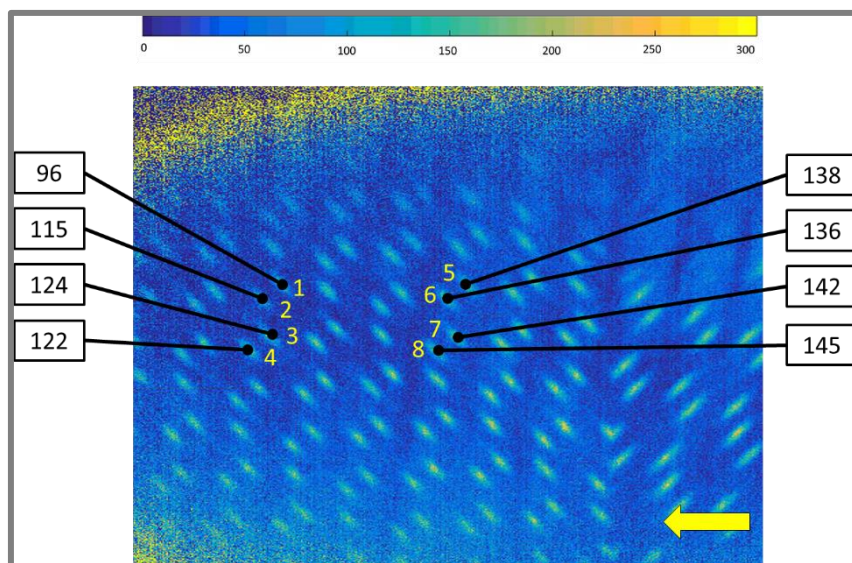
Vlivem zvýšené rychlosti se za některými vtisky (Obr. 6-4) začalo objevovat lokální navýšení (označené červenými čarami) tloušťky filmu maziva, které zasahovalo až k dalšímu vtisku. Hodnota lokálního navýšení byla v rozmezí (30-70 nm) v závislosti na rychlosti otáčení.



Obr. 6-4 Lokální navýšení tloušťky mazacího filmu v oblasti za vtiskem (a-oblast na vtoku do kontaktu, b- stejná oblast nacházející se blíže středu kontaktu)

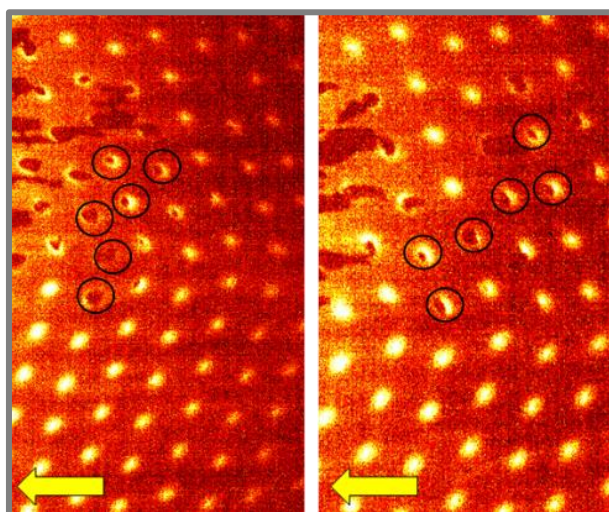
Pozorování kavitace

Mazivo bylo z vtisků vytlačováno vznikem místní kavitace. Na Obr. 6-5 je znázorněn rozdíl intenzit světla v jednotlivých vtiscích. U vtisků nacházejících se před vstupem do kontaktu dosahovala intenzita v průměru o 20 % vyšších hodnot oproti vtiskům v kontaktní oblasti. Snížená intenzita světla potvrzuje vznik místní kavitace a vytlačování maziva z naplněných textur. Při nejnižších rychlostech otáčení mohlo být mazivo z vtisků vytlačováno vlivem elastických deformací. Při vyšších rychlostech (nemělo by docházet k elastickým deformacím) se kavitace (resp. lokální navýšení tloušťky) začala objevovat stále častěji, což odpovídá studii [13], kde autoři dospěli k závěru, že vznik a rozvoj kavitace je závislý na rychlosti otáčení. Vzhledem k Obr. 2-2 by se měla na zadní hraně textury vytvářet kavitační bublina způsobující asymetrické rozložení tlaku. Takto detailní studium jednotlivých vtisků však nebylo v dané práci možné a nelze tak přesně stanovit místo vzniku kavitace.



Obr. 6-5 Rozdílné množství maziva v jednotlivých vtiscích vlivem vzniku místní kavitace při zatížení 70 N a rychlosti $0,09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (vtisky 1-4 jsou blíže středu kontaktu a vtisky 5-8 jsou ve větší vzdálenosti od středu kontaktu)

Kavitaci (Obr. 6-6) vznikající v jednotlivých vtiscích (označeno černými kolečky) bylo možné pozorovat až v oblasti za středem kontaktu, kde už docházelo k poklesu tlaku. Z obrázku je zřejmé, že kavitace u většiny vtisků vznikala na odtokové hraně, což neodpovídá teoretickému předpokladu z Obr. 2-2.



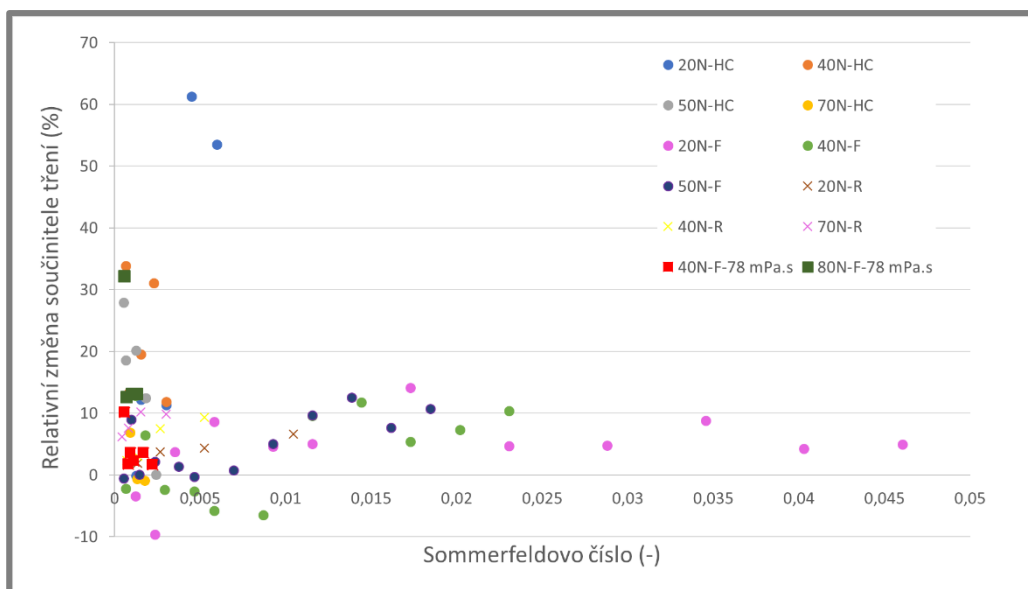
Obr. 6-6 Vznik kavitace v jednotlivých vtiscích v oblasti za středem kontaktu

6.1.2 Vliv textur v hydrodynamickém režimu mazání

V hydrodynamickém režimu mazání (Obr. 6-7) měly textury mnohem menší vliv na nárůst hodnot tření, než tomu bylo u smíšeného režimu. V provedených experimentech se hydrodynamický režim vyskytoval buď při vyšších rychlostech otáčení (více než $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) u oleje s nižší viskozitou, nebo aplikací oleje s vysokou dynamickou viskozitou, kde experimenty v daném režimu probíhaly už od nejnižších rychlostí.

U maziv s nízkou viskozitou se po přechodu ze smíšeného režimu hodnoty tření u obou vzorků téměř vyrovnaly, ale postupným navyšováním rychlosti se opět projevoval negativní vliv vtisků. Z měření vyplynulo, že s narůstajícím zatížením dochází postupně k poklesu negativního vlivu texturovaného povrchu. Nejvýraznější relativní změny byly zjištěny při nejnižším zatížení (20 N) a nejvyšších rychlostech ($0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), kde docházelo až k 60% nárůstu hodnot tření. Následným navyšováním zatížení se relativní změny postupně snižovaly a dosažením maximální hodnoty (70 N) už byly hodnoty tření u obou vzorků téměř totožné.

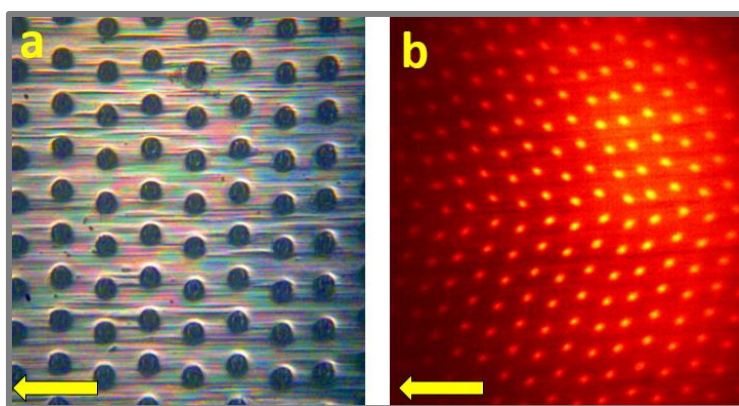
U maziv s vysokou dynamickou viskozitou (F-416 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ a R-470 $\text{mPa}\cdot\text{s}$) byl trend opačný a se zvyšujícím zatížením se naopak relativní změny navyšovaly. Minimální relativní změny byly zjištěny při nejnižších rychlostech otáčení a nejnižším zatížení, kde docházelo i k mírnému snížení hodnot tření vlivem texturovaného povrchu. Toto snížení však bylo velice nízké a mohlo být způsobeno pouze vlivem nepřesnosti měření. Následným navyšováním zatížení a rychlostí se hodnoty relativních změn postupně navyšovaly a dosažením určitých rychlostí se následně ustálily. U vysoko viskózních olejů bylo průměrně dosahováno až čtyřnásobně nižších hodnot relativních změn oproti olejům s nízkou dynamickou viskozitou. Tento výsledek koresponduje se studií [10], kde se na základě pozorování vlivu vtisků v různých olejích dosáhlo pozitivních výsledků aplikováním maziv s vyšší viskozitou.



Obr. 6-7 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (kladná procenta představují navýšení hodnot tření vlivem vtisků a záporná naopak snížení)

Optickým pozorováním bylo zjištěno, že u maziv s vysokou dynamickou viskozitou se už při nejnižších rychlostech otáčení v kontaktu nacházel tlustý film maziva

(450 nm). U texturovaného povrchu byla tloušťka filmu přibližně o 50 nm menší, což se projevilo i mírným nárůstem tření (5 %). S narůstající rychlostí se tloušťka výrazně navyšovala a nebylo možné získané výsledky vyhodnotit. V průběhu měření nebyla u fluorovaného maziva F (Obr. 6-8 a) ani minerálního oleje R (Obr. 6-8 b) viditelná kavitace, která by způsobovala asymetrické rozložení tlaku v textuře a tím navýšení únosnosti. Vliv vtisků zde tedy neodpovídal teoretickým předpokladům, což se projevilo nižší tloušťkou maziva a vyšším třením.



Obr. 6-8 Kontaktní oblast texturovaného vzorku při rychlosti 0,018 m/s (a-optická interferometrie, zatížení 50 N a viskozita 416 mPa·s; b-fluorescence, zatížení 40 N a viskozita 470 mPa·s)

Negativní vliv texturovaného povrchu na hodnoty tření (resp. tloušťku filmu maziva) v hydrodynamickém režimu mazání mohl být způsoben nevhodnou konfigurací texturovaného tělesa. Výsledky studie [18] poukazují na mnohem lepší výsledky dosažené u částečně texturovaných povrchů, oproti povrchům plně texturovaným. V dané práci byly však použity vzorky, jejichž vnější povrch byl zcela pokryt vtisky. Výhodnější by bylo tedy texturovat pouze část povrchu v kontaktu na vtoku kluzné pánve. Dalším důvodem negativních výsledků mohla být nevhodná hloubka a hustota použitých vtisků. Podle studie [9] je tvorba kavitace závislá na hloubce použitých vtisků, a pokud tedy není zvolena optimální hloubka, mohou vtisky způsobovat nárůst tření.

6.2 Experimentální zařízení

6.2

Při měření konformních kontaktů je velice nutné přesné ustavení kontaktních těles, což bylo potvrzeno i prvními experimenty, kde se výsledné hodnoty lišily od teoretických předpokladů. V dané práci tak bylo vyzkoušeno několik úprav, které umožnily safíru jeho samovolné ustavení vůči měřeným vzorkům, čímž byla zajištěna souosost kontaktních těles. Toto může být jeden z hlavních problémů při měření s danou konfigurací, jelikož pokud nebude zajištěno přesné ustavení, mohou být vtisky vlivem nepřesných výsledků označeny za negativní. Zejména pokud není k experimentům využito optické pozorování, není možné detailněji kontrolovat tvar utvářeného kontaktu.

K dosažení spolehlivých výsledků měření tření v konformním kontaktu je nutná dobrá opakovatelnost a reprodukovatelnost měření. V dané práci byla při měření reprodukovatelnosti zjištěna průměrná odchylka 7 % a u opakovatelnosti 4 %. V hydrodynamickém režimu byly měřeny hodnoty součinitele tření v řádech tisícín

a mezi jednotlivými typy vzorků byly nejčastěji zjištěny změny okolo 10 %. Naměřené hodnoty byly ustálené a nedocházelo ke střídavým změnám mezi kladnými a zápornými procenty. Pokud by bylo měření provedeno na nepřesném zařízení, mohly by být změny vlivem texturovaných povrchů způsobeny pouze chybou měření. S tím souvisí i volba vhodného snímače krouticího momentu. V průběhu provedených experimentů bylo dosaženo maximální hodnoty krouticího momentu 0,12 Nm a použitý snímač má rozsah do 1 Nm. Pro přesnější měření by mohl být do budoucna tribometr Rtec osazen snímačem s nižším měřicím rozsahem., což sebou přináší problém s výraznější citlivostí na měření tření podpůrných ložisek.

6.3 Optické pozorování

Jedním z hlavních cílů této práce bylo rozšíření tribometru block-on-ring o optické pozorování umožňující detailní studium funkcí cíleně modifikovaných povrchů. Pro pozorování kontaktu byly použity dvě optické metody, a to metoda optické interferometrie a fluorescence.

6.3.1 Optická interferometrie

U optické interferometrie je kvalita výsledných interferogramů závislá na rozdílu indexů lomu jednotlivých prostředí. Z daného důvodu se u většiny experimentů vzorky opatřují chromovou vrstvou, pomocí které je možné výrazně navýšit indexový rozdíl. V dané práci však nebyla tato vrstva na povrchy vzorků nanесena (z důvodu obtížné aplikace) a získané interferogramy tak neměly dostatečný interferenční kontrast a muselo být provedeno zesílení kontrastu a saturace barev.

Pro alespoň částečné navýšení intenzity se namísto minerálního oleje (index lomu 1,5) použilo fluorované mazivo (index lomu 1,3), čímž bylo dosaženo výraznějšího rozdílu indexů na rozhraní mazivo-safír. U texturovaných vzorků i tak nastávaly velké lokální změny tloušťky, které znesnadňovaly vyhodnocení. Vzhledem k nízké kvalitě interferogramů bylo prakticky nemožné detailně pozorovat chování maziva v jednotlivých vtiscích a to zejména při vyšších rychlostech. Pokud je pomocí této metody cílem zkoumat texturovaný povrch za vyšších rychlostí (nad $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), je nutné použít vysokorychlostní kameru umožňující krátkou expoziční dobu a objektiv s několikanásobným zvětšením, aby bylo možné detailně zaznamenat rychle probíhající děj. V dané práci byl použit objektiv s pětinasobným zvětšením a nebylo možné podrobněji pozorovat děje probíhající přímo v jednotlivých vtiscích.

Výhoda dané metody však spočívá ve schopnosti zaznamenávat detailně utváření mazacího filmu v texturovaném povrchu a to zejména v možnosti pozorovat lokální navyšování tloušťky mazací vrstvy.

Kromě bílého osvětlení bylo u dané metody vyzkoušeno i monochromatické světlo. Při jeho aplikaci se však ukázala nutnost širšího záběru kontaktu, aby bylo možné pozorovat posun jednotlivých interferenčních proužků, na základě kterých se stanovuje tloušťka filmu maziva. U texturovaného povrchu byly navíc proužky špatně viditelné a prakticky nevyhodnotitelné. Z daných důvodů se toto osvětlení ukázalo jako nevhodné.

6.3.2 Fluorescenční metoda

U fluorescenční metody je tloušťka filmu maziva vyhodnocována na základě intenzity světla emitovaného mazivem v kontaktu. Z daného důvodu bylo během měření nutné dbát na homogenitu osvětlení, aby změny intenzity byly skutečně způsobeny pouze změnou tloušťky maziva a nebylo to zapříčiněno nerovnoměrným osvětlením. Pro realizaci měření je potřeba použít maziva obarvovat, čímž dochází k ovlivnění jejich chemických a reologických vlastností. Výjimku tvoří minerální maziva, která mají schopnost přirozené fluorescence. Jako značná nevýhoda se rovněž ukázala možnost vyhodnocovat tloušťky pouze na základě bezrozměrné hodnoty intenzity světla, jelikož nebyl odladěn způsob, jak přesněji zkalibrovat údaje o intenzitě s hodnotami tloušťky v nanometrech.

Oproti optické interferometrii bylo u této metody omezení v expoziční době. U fluorescenční metody bylo možné expoziční dobu snížit na hodnotu 0,1 ms, ale u optické interferometrie až na hodnotu 0,02 ms. K měření je rovněž nutné využít vhodnou kameru. V dané práci použitá kamera neumožňovala pro vyčítání snímků použít metodu „global shutter“, ale pouze „rolling shutter“, což znamená, že nesnímala celou oblast obrazu současně, ale postupně ji skenovala z jedné strany snímače na druhou po řádku a docházelo tak ke zkreslení zaznamenávaného pohybu.

I přes výše popsané nevýhody je tato metoda vhodná pro studium funkcí texturovaných povrchů. Z hlediska vyhodnocování zaznamenaných snímků, bylo pomocí programu v softwaru Matlab možné vybrat pouze určitou oblast, ve které má být intenzita vyhodnocena. To je výhodné zejména z hlediska pozorování změny tloušťky maziva v jednotlivých texturách a v okolních oblastech, ve kterých dochází k jejímu lokálnímu snížení. Při určitém nastavení bylo možné pomocí fluorescence pozorovat místní kavitaci vznikající ve vtiscích, což u metody optické interferometrie bylo prakticky nemožné. Oproti optické interferometrii má fluorescence ještě výhodu v širším rozsahu měřených tlouštěk a zejména ve schopnosti zaznamenávat tloušťku i při vyšších rychlostech.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo experimentálně objasnit spojitosti mezi třením vzorku s cíleně modifikovaným povrchem a optickým pozorováním plochy kluzného kontaktu. Vliv texturovaných povrchů je zde zkoumán v konfiguraci kluzného ložiska. Dílčími cíli byla především úprava použitého tribometru block-on-ring a realizace experimentů se vzorky s texturovaným povrchem.

Z rešeršní části práce vyplynulo, že studie se vlivem texturovaných povrchů zabývají již od roku 1966 a většina z nich se shoduje na závěru, že snížení tření závisí na geometrických parametrech textury a provozních podmínkách. Pokud jsou pro dané provozní podmínky zvoleny vtisky nevhodných rozměrů, může být účinek opačný a hodnoty tření se budou naopak navyšovat. Studie zabývající se vlivem vtisků v konfiguraci kluzného ložiska jsou převážně numerického charakteru a jde výrazná absence experimentálního ověření. Doposud rovněž testování většinou probíhalo bez možnosti přímého vhledu do kontaktu a nebylo možné získat informace o dějích probíhajících uvnitř pro interpretaci tření.

K dosažení konfigurace kluzného ložiska byla nutná úprava tribometru block-on-ring, která spočívala v nahrazení běžně používaného bloku kruhovou úsečí, což vyžadovalo návrh nového držáku pro její uchycení a umístění snímače momentu k záznamu hodnot tření. Z důvodu absence experimentálních studií zabývajících se danou problematikou, byly vzorky opatřeny vtisky o parametrech vycházejících z provedených výzkumů s odlišnými konfiguracemi. Pro měření tloušťky mazacího filmu a kavitacních procesů byly na použitém zařízení aplikovány dvě optické metody (optická interferometrie a fluorescence).

V experimentální části byl zjišťován vliv texturovaného povrchu na součinitel tření a tloušťku mazacího filmu při zatížení v rozmezí (20-80) N, rychlosti (0,018-0,73) m·s⁻¹ a odlišné viskozitě maziv (53,4; 78; 416 a 470 mPa·s).

Ve smíšeném režimu mazání způsobuje texturovaný povrch výrazné navýšení hodnot tření a posun přechodu do hydrodynamického režimu mazání na vyšší obvodové rychlosti. Negativní vliv vtisků v daném režimu narůstá se zvyšující se velikostí zatížení. Při nejnižších rychlostech je zatížení přenášeno na velmi malé ploše a dochází ke vzniku EHD režimu. Při těchto podmínkách je mazivo vlivem zatížení vytlačováno z prostoru mezi vtisky (oblasti s vysokým tlakem) do jednotlivých vtisků (nižší tlak) a dochází tak ke snížení tloušťky filmu maziva oproti hladkému povrchu.

V hydrodynamickém režimu mají textury výrazně nižší negativní vliv na výsledné hodnoty, než tomu je ve smíšeném režimu. Změny jsou zde závislé na všech provozních parametrech a zjištěné závislosti jsou následující:

- u maziv s nízkou viskozitou se negativní vliv vtisků snižuje s narůstajícím zatížením
- u maziv s vysokou viskozitou je trend opačný a s narůstajícím zatížením se naopak negativní vliv vtisků navyšuje
- u vysoko viskózních maziv je průměrně dosahováno až čtyřnásobně nižších hodnot relativních změn oproti olejům s nízkou viskozitou

Během měření v hydrodynamickém režimu nebyl pozorován vznik kavitace, která by způsobovala asymetrické rozložení tlaku v textuře a tím i navýšení únosnosti. Vliv

vtisků zde tedy neodpovídal teoretickým předpokladům, což se projevilo nižší tloušťkou maziva a vyšším třením.

V případě dalšího výzkumu v této oblasti by bylo vhodné, využitím upraveného zařízení a aplikovaných optických metod, realizovat experimenty se vzorky, které by měly pouze částečně texturovaný povrch. Rovněž by bylo zajímavé vyzkoušet konfiguraci, při které by textury naopak pokrývaly povrch kruhové úseče, která by doléhala na safírový element, prostřednictvím kterého by bylo možné pozorovat probíhající děj. Tato změna by vyžadovala letmo uloženou hřídel zakončenou dutým safírovým válcem. Optické pozorování by pak bylo zalomeno do kontaktu ze strany uvnitř safírového válce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VRBKA, Martin. Studium vlivu cílené modifikace topografie na únavové poškození třecích povrchů. Brno, 2011. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [2] GROPPER, Daniel; WANG, Ling; HARVEY, Terry J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International*, 2016, vol. 94: s. 509-529.
- [3] IBATAN, T., M.S. UDDIN a M.A.K. CHOWDHURY. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. *Surface and Coatings Technology*. 2015, vol. 272, s. 102-120. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.017. ISSN 02578972.
- [4] RAIMONDI, A A a John BOYD. A Solution for the Finite Journal Bearing and its Application to Analysis and Design: I. *A S L E Transactions*. 1958, 1(1), 159–174. ISSN 0569-8197. DOI: 10.1080/05698195808972328
- [5] RONEN, Aviram, Izhak ETSION a Yuri KLIGERMAN. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. *Tribology Transactions* . 2001, vol. 44, no. 3, s. 359-366. DOI: 10.1080/10402000108982468. ISSN 1040-2004.
- [6] GACHOT, C., A. ROSENKRANZ, S.M. HSU a H.L. COSTA. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*. Elsevier B.V, 2017, 372-373, 21-41. DOI: 10.1016/j.wear.2016.11.020. ISSN 0043-1648
- [7] PETTERSSON, U. a S. JACOBSON. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique. *Tribology International*. 2006, vol. 39, no. 7, s. 695-700. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.06.004. ISSN 0301679x.
- [8] ETSION, Izhak. State of the Art in Laser Surface Texturing. *Journal of Tribology*. 2005, vol. 127, no. 1, s. 248-. DOI: 10.1115/1.1828070. ISSN 07424787.
- [9] SCARAGGI, Michele, Francesco P. MEZZAPESA, Giuseppe CARBONE, Antonio ANCONA, Donato SORGENTE a Pietro Mario LUGARÀ. Minimize friction of lubricated laser-microtextured-surfaces by tuning microholes depth. *Tribology International*. 2014, vol. 75, s. 123-127. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.03.014. ISSN 0301679x.
- [10] KOVALCHENKO, Andriy, Oyelayo AJAYI, Ali ERDEMIR, George FENSKE a Izhak ETSION. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. *Tribology International*. 2005, vol. 38, no. 3, s. 219-225. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.08.004. ISSN 0301679x.

- [11] LU, Xiaobin a M. M. KHONSARI. An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings. *Tribology Letters*. 2007-6-25, vol. 27, no. 2, s. 169-176. DOI: 10.1007/s11249-007-9217-x. ISSN 1023-8883.
- [12] HENRY, Y., J. BOUYER a M. FILLON. An experimental analysis of the hydrodynamic contribution of textured thrust bearings during steady-state operation: A comparison with the untextured parallel surface configuration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2015, vol. 229, no. 4, s. 362-375. DOI: 10.1177/1350650114537484. ISSN 1350-6501.
- [13] QIU, Y. a M.M. KHONSARI. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings. *Tribology International*. 2011, vol. 44, no. 5, s. 635-644. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.01.003. ISSN 0301679x.
- [14] S.-C. Vladescu, A.V.Olver, I.G.Pegg, T.Reddyhoff, The effects of surface texture in reciprocating contacts – An experimental study, *Tribol. Int.* 82(PartA) (2015)28–42.
- [15] YU, Haiwu, Xiaolei WANG a Fei ZHOU. Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure Between Conformal Contacting Surfaces. *Tribology Letters*. 2010, vol. 37, no. 2, s. 123-130. DOI: 10.1007/s11249-009-9497-4. ISSN 1023-8883.
- [16] QIU, Mingfeng, Bret R. MINSON a Bart RAEYMAEKERS. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings. *Tribology International*. 2013, vol. 67, s. 278-288. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.08.004. ISSN 0301679x.
- [17] ADATEPE, Hakan, Aydın BIYIKLIOGLU a Hasan SOFUOGLU. An investigation of tribological behaviors of dynamically loaded non-grooved and micro-grooved journal bearings. *Tribology International*. 2013, vol. 58, s. 12-19. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.09.009. ISSN 0301679x.
- [18] DOBRICA, M B, M FILLON, M D PASCOVICI a T CICONI. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, 224(8), 737-750. DOI: 10.1243/13506501JET673. ISSN 1350-6501.
- [19] Multi Function Tribometer: Nano, Micro and Macro Range Tester. Rtec instruments. San Jose: 2012 Rtec-instruments Product Catalogue.
- [20] HAUGLAND, R. P., M. T. SPENCE a I. D. JOHNSON. Handbook of fluorescent probes and research chemicals. 6th ed. Eugene, OR, USA (4849 Pitchford Ave., Eugene 97402): Molecular Probes, c1996, xii, 680 p. ISBN 09-652-2400-7.

- [21] KEITH, Theo G. Standard handbook of machine design. Journal bearings. Toledo, Ohio, Chapter 28, čl. 28.1-28.8.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**9****9.1 Seznam použitých zkratk**

9.1

EHD	- elasto-hydrodynamický režim mazání
F	- fluorované mazivo Fomblin PFPE YL VAC 25/6
HC	- minerální olej HC 32/130
LST	- Laser Surface Texturing
MFT	- Multifunctional tribometer
R	- minerální olej R553/73

9.2 Seznam použitých symbolů

9.2

a	[-]	- součinitel mezného tření
b	[-]	- parametr přechodu
B	[°]	- úhel parciálního ložiska
c	[-]	- parametr závislý na viskozitě
C	[mm]	- minimální radiální vůle
$c \cdot v^d$	[-]	- člen viskózního tření
cof_{BL}	[-]	- součinitel tření v mezném režimu
cof_{HD}	[-]	- součinitel tření v hydrodynamickém režimu
d	[-]	- koeficient mocninné závislosti
D	[mm]	- průměr textury
E	[GPa]	- modul pružnosti
f, cof, μ	[-]	- součinitel tření
$f_{\text{par.2}}$	[-]	- parazitní tření
F_N	[N]	- normálová síla
F_t	[N]	- třecí síla
h	[mm]	- hloubka vtisku
h_o	[μm]	- minimální tloušťka mazacího filmu
h_{opt}	[mm]	- optimální hloubka vtisku
i	[mm]	- rozteč mezi texturami
l	[mm]	- délka ložiska
n	[s^{-1}]	- rychlost otáčení
p	[Pa]	- tlak filmu maziva
P	[Pa]	- tlak
p_h, S_p	[-]	- hustota texturované oblasti
R, r	[mm]	- poloměr čepu
R_{qa}	[μm]	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa a
R_{qb}	[μm]	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa b
S	[-]	- Sommerfeldovo číslo
U	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	- kluzná rychlost
v	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	- obvodová rychlost
ε	[-]	- poměr stran vtisku
η	[Pa·s]	- dynamická viskozita
Λ	[-]	- parametr mazání

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Částečně texturovaný povrch kroužku axiálního ložiska [2]	15
Obr. 2-2 a-buňka textury, b-rozložení tlaku v buňce textury s vlivem kavitace, c-rozložení tlaku v buňce textury s vlivem setrvačných sil, d-„stepped“ profil, e-texturovaný profil, f-rozložení tlaků [2]	16
Obr. 2-3 Postup tvorby texturovacího nástroje [7].....	17
Obr. 2-4 A-proces texturování povrchu kuličky, B-výsledný texturovaný povrch [7]	18
Obr. 2-5 Způsob texturování rovinných vzorků [7]	18
Obr. 2-6 a) vzorek před leštěním, b) vzorek po leštění [7]	18
Obr. 2-7 (a) Schéma konfigurace měření (b) obrázek měřícího zařízení (c) obrázek kontaktní plochy pinu [10]	19
Obr. 2-8 Povrchové struktury testovaných vzorků [10]	20
Obr. 2-9 Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti pro testované vzorky v oleji s nízkou viskozitou; (a) Disk 1 - leštěný povrch bez vtisků (modrá), Disk 2 - neleštěný povrch bez vtisků (tmavě zelená), Disk 3 - standardní LST (červená); (b) Disk 4 - vysoká hustota vtisků (zelená), Disk 5 - standardní LST bez lapování (fialová), Disk 6 - nízká hustota vtisků (tmavě červená), Disk 3 - standardní LST (červená) [10]	21
Obr. 2-10 Závislost koeficientu tření na kluzné rychlosti pro testované vzorky v oleji s vysokou viskozitou; (a) Disk 1 - leštěný povrch bez vtisků (modrá), Disk 2 - neleštěný povrch bez vtisků (tmavě zelená), Disk 3 - standardní LST (červená); (b) Disk 4 - vysoká hustota vtisků (zelená), Disk 5 - standardní LST bez lapování (fialová), Disk 6 - nízká hustota vtisků (tmavě červená), Disk 3 - standardní LST (červená) [10]	21
Obr. 2-11 a) Pin-on-disk tribometr, b) pin z ocelové kuličky [9].....	22
Obr. 2-12 Hodnoty tření v závislosti na vztahu mezi viskozitou a kluznou rychlostí pro vtisky o průměru 100 μm [9].....	22
Obr. 2-13 Hodnoty tření v závislosti na vztahu mezi viskozitou a kluznou rychlostí pro vtisky o průměru 50 μm [9].....	23
Obr. 2-14 Vliv hloubky důlků na průtok maziva kontaktem [9].....	23
Obr. 2-15 a) obráběná pouzdra, b) leptaná pouzdra [11]	24
Obr. 2-16 Koeficient tření v závislosti na otáčkách (zatížení 667 N, olej SAE30) [11]	24
Obr. 2-17 Koeficient tření v závislosti na otáčkách (zatížení 667 N, olej GT32) [11]	25
Obr. 2-18 Rozložení tlaku ve vtisku po směru toku [11].....	25
Obr. 2-19 Texturovaný kroužek axiálního ložiska [12]	26
Obr. 2-20 (a) umístění vtisku uprostřed buňky, (b) umístění vtisku na hraně buňky [12]	27
Obr. 2-21 A-závislost teploty na zatížení jednotlivých vzorků, B-závislost třecího momentu na zatížení jednotlivých vzorků [12]	27
Obr. 2-22 Povrch bez zvlnění (A) a se zvlněním (B) [13]	28
Obr. 2-23 Odlišné tvary vytvořených vtisků [14]	28
Obr. 2-24 Vtisk procházející kontaktem [14].....	29
Obr. 2-25 Model pro analytické řešení [15].....	30
Obr. 2-26 (a)-vtisk tvaru kruhu (b)-vtisk tvaru elipsy (c)-vtisk tvaru trojúhelníku [15]	30
Obr. 2-27 Průměrný generovaný tlak pro odlišné tvary a orientace textur pro dvě různé skluzové rychlosti [15].....	31
Obr. 2-28 Analytický model (a-pohled z boku, b-pohled ze shora) [16]	31
Obr. 2-29 Použité směry rýh [17]	32
Obr. 2-30 Tloušťka maziva a hodnoty tlaku získané pomocí algoritmů u: (a) plně texturovaných povrchů; (b) částečně texturovaných povrchů [18].....	33
Obr. 4-1 Schéma postupu práce	36
Obr. 4-2 Modul block-on-ring RTEC tribometru umístěného na Ústavu konstruování.....	37
Obr. 4-3 Schéma navrhovaných úprav tribometru block-on-ring	38
Obr. 4-4 Oblast umístění snímače momentu.....	38
Obr. 4-5 Návrh úpravy měřícího modulu.....	39
Obr. 4-6 Upravená část modulu block-on-ring	39
Obr. 4-7 Program pro záznam naměřených hodnot kroutícího momentu	40
Obr. 4-8 Proces měření tření	40
Obr. 4-9 Navržený držák.....	41

Obr. 4-10 Spodní část držáku doléhající na použitý vzorek	41
Obr. 4-11 Schéma principu zatěžování vzorku a optického pozorování	42
Obr. 4-12 Posuvný stůl s mikrometrickým šroubem pro upevnění měřicích soustav	42
Obr. 4-13 Experimentální zařízení pro měření s využitím optické interferometrie	43
Obr. 4-14 Princip optické interferometrie a hodnoty interference pro jednotlivá rozhraní s fluorovaným mazivem	44
Obr. 4-15 Interferogram statického kontaktu hladkého vzorku	44
Obr. 4-16 A- statický kontakt netexturovaného vzorku a safíru, B-navyšování tloušťky mazacího filmu v daném kontaktu.....	45
Obr. 4-17 Stokesův posun	45
Obr. 4-18 Experimentální zařízení pro měření s využitím fluorescenční metody	46
Obr. 4-19 Vyhodnocení tloušťky maziva na základě intenzity světla	47
Obr. 4-20 Vytvořené vtisky na vzorcích.....	47
Obr. 4-21 Vnější kroužky ložisek od firmy TIMKEN (použité vzorky)	47
Obr. 4-22 Rozmístění vtisků na povrchu vzorků	48
Obr. 4-23 Rozměry safírové úseče	48
Obr. 4-24 Závislost dynamické viskozity oleje HC 130/32 na teplotě	49
Obr. 4-25 Závislost dynamické viskozity maziv R a F na teplotě	49
Obr. 4-26 Závislost poměru (R/C)f na Sommerfeldově čísle pro daný typ kluzného ložiska [4].....	50
Obr. 5-1 Měření na upraveném zařízení	52
Obr. 5-2 První měření pro ověření funkčnosti zařízení - nepříznivé výsledky (zatížení 20 N a viskozita 53,4 mPa·s)	52
Obr. 5-3 Měření s upraveným uchycením držáku safíru (zatížení 20 N a viskozita 53,4 mPa·s).....	53
Obr. 5-4 Opakovatelnost měření při úplném rozebrání zařízení (zatížení 20 N a viskozita 53,4 mPa·s)	54
Obr. 5-5 Opakovatelnost měření bez rozebrání zařízení (zatížení 60 N a viskozita 53,4 mPa·s).....	54
Obr. 5-6 Závislost kroutícího momentu na čase (zatížení 20 N, otáčky 100 ot·min ⁻¹ , viskozita 53,4 mPa·s a délka testu 4,5 minuty).....	55
Obr. 5-7 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 20 a 40 N; viskozita: 53,4 a 416 mPa·s)	57
Obr. 5-8 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 50 a 70 N; viskozita: 53,4 a 416 mPa·s)	58
Obr. 5-9 Závislost součinitele tření na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení: 40 a 80 N; viskozita: 78 mPa·s)	59
Obr. 5-10 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (mazivo HC-53,4 mPa·s a F-78 mPa·s)	60
Obr. 5-11 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (mazivo F-416 mPa·s a R-470 mPa·s)	61
Obr. 5-12 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 40 N a viskozitě 78 mPa·s (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b-0,018 m·s ⁻¹ , c-0,037 m·s ⁻¹ , d-0,055 m·s ⁻¹ ; Texturovaný vzorek: e-statický kontakt, f-0,018 m·s ⁻¹ , g-0,037 m·s ⁻¹ , h-0,055 m·s ⁻¹	62
Obr. 5-13 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 80 N a viskozitě 78 mPa·s (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b-0,018 m·s ⁻¹ , c-0,037 m·s ⁻¹ , d-0,055 m·s ⁻¹ , e-0,11 m·s ⁻¹ ; Texturovaný vzorek: f-statický kontakt, g-0,018 m·s ⁻¹ , h-0,037 m·s ⁻¹ , i-0,055 m·s ⁻¹ , i- 0,11 m·s ⁻¹)	63
Obr. 5-14 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 50 N a viskozitě 416 mPa·s (Hladký vzorek: a-0,018 m·s ⁻¹ , b-0,037 m·s ⁻¹ ; Texturovaný vzorek: c-0,018 m·s ⁻¹ , d-0,037 m·s ⁻¹)	64
Obr. 5-15 Experimentální tloušťka mazacího filmu u hladkého a texturovaného vzorku při zatížení 20 N a viskozitě 53,4 mPa·s (Hladký vzorek: a-statický kontakt, b-0,018 m·s ⁻¹ , c-0,037 m·s ⁻¹ , d-0,055 m·s ⁻¹ , e-0,09 m·s ⁻¹ , f-0,15 m·s ⁻¹ , g-0,18 m·s ⁻¹ ; Texturovaný vzorek: h-statický kontakt, ch-0,018 m·s ⁻¹ , i-0,037 m·s ⁻¹ , j-0,055 m·s ⁻¹ , k-0,09 m·s ⁻¹ , l-0,15 m·s ⁻¹ , m-0,18 m·s ⁻¹)	65
Obr. 5-16 Závislost intenzity světla na rychlosti otáčení pro dva použité vzorky (zatížení 20 a 70 N, viskozita 53,4 mPa·s)	66
Obr. 5-17 Hodnota intenzity světla v jednotlivých vtiscích ve statickém kontaktu texturovaného vzorku při zatížení 70 N	67
Obr. 5-18 Hodnota intenzity světla v jednotlivých vtiscích při zatížení 70 N a rychlosti 0,055 m·s ⁻¹	67
Obr. 5-19 Kontaktní a kavitační oblast u hladkého vzorku	68

Obr. 5-20 Kontaktní a kavitační oblast u texturovaného vzorku.....	68
Obr. 5-21 Zaplavení kontaktu mazivem při vyšších rychlostech otáčení.....	69
Obr. 5-22 Přítomnost maziva pouze v řadě vtisků	69
Obr. 5-23 Lokální navýšení tloušťky mazacího filmu za vtiskem (a-oblast na vtoku do kontaktu, b- stejná oblast nacházející se blíže středu kontaktu	69
Obr. 6-1 Místa s nulovou tloušťkou maziva v kontaktní oblasti texturovaného vzorku (optická interferometrie-80N; 0,018 m·s ⁻¹ a 78 mPa·s)	70
Obr. 6-2 Nízká intenzita světla v oblastech okolo vtisků (fluorescence-80N; 0,018 m·s ⁻¹ a 53,4 mPa·s)	70
Obr. 6-3 Kontakt hladkého a texturovaného povrchu	71
Obr. 6-4 Lokální navýšení tloušťky mazacího filmu v oblasti za vtiskem (a-oblast na vtoku do kontaktu, b- stejná oblast nacházející se blíže středu kontaktu	72
Obr. 6-5 Rozdílné množství maziva v jednotlivých vtiscích vlivem vzniku místní kavitace při zatížení 70 N a rychlosti 0,09 m·s ⁻¹ (vtisky 1-4 jsou blíže středu kontaktu a vtisky 5-8 jsou ve větší vzdálenosti od středu kontaktu)	73
Obr. 6-6 Vznik kavitace v jednotlivých vtiscích v oblasti za středem kontaktu	73
Obr. 6-7 Relativní změny součinitele tření vlivem texturovaného povrchu v hydrodynamickém režimu mazání (kladná procenta představují navýšení hodnot tření vlivem vtisků a záporná naopak snížení).....	74
Obr. 6-8 Kontaktní oblast texturovaného vzorku při rychlosti 0,018 m/s (a-optická interferometrie, zatížení 50 N a viskozita 416 mPa·s; b-fluorescence, zatížení 40 N a viskozita 470 mPa·s)	75

11 SEZNAM TABULEK**11**

Tab. 2-1 Geometrie vtisků u jednotlivých vzorků	20
Tab. 4-1 Teoreticky stanovené hodnoty součinitele tření	51
Tab. 5-1 Změny vlivem texturovaného povrchu v porovnání s hladkým povrchem (mazivo HC a F)	58
Tab. 5-2 Změny vlivem texturovaného povrchu v porovnání s hladkým povrchem (mazivo F-56°C)	60

12 SEZNAM PŘÍLOH

1. Tabulka dat k proložení naměřených hodnot
2. Publikace výsledků

Výkresová dokumentace

<i>Název výkresu</i>	<i>Druh výkresu</i>	<i>Číslo výkresu</i>
3. HŘÍDEL DELŠÍ	Výkres součásti	3-2017-01
4. HŘÍDEL KRATŠÍ	Výkres součásti	4-2017-02
5. LOŽISKOVÝ DOMEK	Výkres součásti	3-2017-03
6. PRODLUŽOVACÍ DESKA	Výkres součásti	4-2017-04
7. RÁM DRŽÁKU	Výkres součásti	4-2017-05
8. DRŽÁK SAFÍRU	Výkres součásti	4-2017-06
9. ÚCHYT DRŽÁKU	Výkres součásti	4-2017-07

PŘÍLOHA 1

Tabulka dat k proložení naměřených hodnot

	a	b	c	d	f_{par.2}
Bez textury-20 N-HC	0,2523	-79,52	0,0132	0,5142	0,0010
Textura-20 N-HC	0,2523	-50,75	0,0224	0,7199	0,0010
Bez textury-40 N-HC	0,2147	-51,89	0,0117	0,8678	0,0011
Textura-40 N-HC	0,2147	-27,61	0,0164	1,1223	0,0011
Bez textury-50 N-HC	0,2145	-49,75	0,0119	0,9244	0,0013
Textura-50 N-HC	0,2145	-25,61	0,0167	1,3945	0,0013
Bez textury-70 N-HC	0,1928	-40,11	0,0134	1,2965	0,0195
Textura-70 N-HC	0,1928	-19,43	0,0126	1,3875	0,0195
Bez textury-20 N-F			0,0823	0,8823	0,0049
Textura-20 N-F			0,0853	0,8566	0,0049
Bez textury-40 N-F			0,0504	0,9229	0,0039
Textura-40 N-F			0,0575	0,9728	0,0039
Bez textury-50 N-F			0,0472	0,8888	0,0025
Textura-50 N-F			0,0533	0,9015	0,0025
Bez textury-40 N-F-56 °C	0,2873	-125,47	0,0241	1,3586	0,0043
Textura-40 N-F-56 °C	0,2873	-78,23	0,0204	1,2225	0,0043
Bez textury-80 N-F-56 °C	0,1314	-53,15	0,0112	0,7024	0,0013
Textura-80 N-F-56 °C	0,1314	-26,97	0,0162	0,9551	0,0013